



UNIVERSITEIT GENT

## EINDRAPPORT:

### *Kwantitatieve analyse van de bijdrage van de vegetatie tot de evapotranspiratie in duinvalleien*

ir. A. Sevenant  
dr. ir. R. Samson  
Prof. dr. R. Lemeur

2002 - 2003



Universiteit Gent  
Vakgroep Toegepaste Ecologie en Milieubiologie  
Laboratorium voor Plantecologie  
Coupure Links 653 9000 Gent België

Vlaamse Gemeenschap Departement Leefmilieu  
Instituut voor Natuurbehoud

VLIZ (vzw)  
VLAAMS INSTITUUT VOOR DE ZEE  
FLANDERS MARINE INSTITUTE  
Oostende - Belgium



60547

## EINDRAPPORT:

### *Kwantitatieve analyse van de bijdrage van de vegetatie tot de evapotranspiratie in duinvalleien*

ir. A. Sevenant  
dr. ir. R. Samson  
Prof. dr. R. Lemeur

2002 - 2003



Universiteit Gent  
Vakgroep Toegepaste Ecologie en Milieubiologie  
Laboratorium voor Plantecologie  
Coupure Links 653 9000 Gent België

Vlaamse Gemeenschap Departement Leefmilieu  
Instituut voor Natuurbehoud

**Contact :** Annelies.Sevenant@rug.ac.be (wetenschapper op het project)  
Roeland.Samson@rug.ac.be (wetenschappelijk coördinator van het project)  
Verbeeck.Hans@rug.ac.be (wetenschapper)  
Nicolas Vanermen (thesisstudent)  
Lieslotte Wackenier (thesisstudent)

**Telefoon :** 09/264.61.14 (Annelies Sevenant)  
09/264.61.13 (Roeland Samson)  
09/264.61.16 (secretariaat)

**Adres :** Universiteit Gent  
Vakgroep Toegepaste Ecologie en Milieubiologie  
Laboratorium voor Plantecologie  
Coupure Links 653 9000 Gent België

**Financier :** Vlaamse Gemeenschap Departement Leefmilieu  
Instituut voor Natuurbehoud

**Refereren als :** **Sevenant, A., Samson, R., Verbeeck, H., Vanermen, N., Wackenier, L., Lemeur, R., 2003.** Kwantitatieve analyse van de bijdrage van de vegetatie tot de evapotranspiratie in duinvalleien, Eindrapport. Gent, Universiteit Gent, 120 p.



## Woord vooraf

Bij het afronden van dit onderzoek, uitgevoerd door het Laboratorium Plantecologie, Universiteit Gent, kunnen wij er niet omheen enkele mensen en instanties te bedanken.

In eerste instantie gaat onze dank uit naar de Vlaamse Gemeenschap Departement Leefmilieu voor de financiering van het project. Graag willen wij ook het Instituut voor Natuurbehoud danken voor het onderzoeksvoorstel en de nabije opvolging van het onderzoek.

Onze speciale dank gaat uit naar de leden van de stuurgroep: Carole Ampe, Dirk Boeye, Jean-Louis Herrier, Willy Huybrechts, Roger Langohr, Luc Lebbe, Marc Leten, Theo Olsthoom, Sam Provoost, Toon Van Daele en Emmanuel Van Houtte. Wij danken hen onder meer voor het vrijmaken van hun tijd, voor het geven van de gepaste *feedback* en de interessante discussies. Speciaal hierbij vermelden we graag Sam Provoost voor de interessante tips en de aanzet van het veldwerk. Jean-Louis Herrier en Marc Leten wensen wij te bedanken voor de vlotte toegang die we verkregen in het natuurreservaat De Westhoek. Roger Langohr en Carole Ampe bedanken we graag voor de tips in verband met het bodemonderzoek en voor het ter beschikking stellen van het benodigde materiaal. We danken eveneens Emmanuel Van Houtte voor het geregeld doorsturen van de neerslaggegevens boven het natuurreservaat De Westhoek.

Een speciaal woordje van dank gaat ook uit naar de thesisstudenten, Nicolas Vanermen en Lieslotte Wackenier, die in het kader van hun thesis een belangrijke bijdrage leverden bij het verzamelen van de velddata. Hans Verbeeck wensen wij te bedanken voor het werk die hij leverde om het FORUG-model aan te passen aan de specifieke duinomstandigheden.

Als laatste, maar zeker niet in het minst, wensen we Annelies Sevenant te bedanken die een jaar lang het beste van zichzelf heeft gegeven voor dit project. Haar enthousiasme, nauwgezetheid en grote gedrevenheid hebben ervoor gezorgd dat dit project mooi kon uitgewerkt en afgerond worden binnen de beperkte onderzoeksperiode.

Gent, 13 februari 2003

Prof. dr. R. Lemeur

dr. ir. R. Samson



## Inhoudstafel

1. SITUERING VAN HET PROJECT .....	6
2. DOELSTELLING.....	7
3. MATERIAAL EN METHODEN .....	8
3.1. Aanduiding van de proefvlakken en de proefsoorten.....	8
3.2. Meteodata.....	11
3.3. Ecofysiologisch onderzoek .....	14
3.3.1. Porometermetingen.....	14
3.3.1.1. Theoretische achtergrond .....	14
3.3.1.2. Veldwerk .....	14
3.3.1.3. Verwerking van de porometermetingen.....	16
3.3.2. Stomataal weerstandsmodel.....	19
3.3.2.1. Theoretische achtergrond .....	19
3.3.2.2. Modelleren .....	20
3.3.2.3. Validering.....	23
3.3.3. LAI metingen.....	25
3.3.3.1. Theoretische achtergrond .....	25
3.3.3.2. Veldwerk: LAI-metingen en vegetatieopnames.....	25
3.4. Modelleren van de evapotranspiratie.....	32
3.4.1. Modelbeschrijving.....	32
3.4.2. Aanpassing van het FORUG-model.....	33
3.5. Bodemonderzoek.....	35
3.5.1. Indringingsweerstand .....	35
3.5.2. Wortelonderzoek .....	35
3.5.2.1. Bewortelingsdiepte en verticale worteldistributie.....	35
3.5.2.2. Indringingsweerstand .....	37
3.6. Grondwatertafeldynamiek.....	38
3.6.1. Achtergrond en doelstellingen.....	38
3.6.2. Peilbuismetingen.....	38
3.6.3. Seizoensale grondwatertafeldynamiek .....	39
3.6.4. Relatie tussen de grondwatertafeldiepte en de worteldiepte.....	39
3.6.5. Diurnale grondwatertafeldynamiek en relatie met de FORUG-resultaten.....	40
4. RESULTATEN EN BESPREKING.....	42
4.1. Ecofysiologisch onderzoek .....	42
4.1.1. Porometermetingen.....	42
4.1.2. Stomataal weerstandsmodel.....	46
4.1.2.1. Modelleren.....	46
4.1.2.2. Validering.....	51
4.1.3. LAI metingen.....	66
4.1.3.1. Destructieve LAI-bepaling.....	66
4.1.3.2. Optische LAI-bepaling.....	72
4.2. Modelleren van de evapotranspiratie.....	76
4.2.1. Aanpassing van het FORUG-model.....	76
4.2.2. Dagverloop van de berekende evapotranspiratie .....	78
4.2.3. Seizoensverloop van de berekende evapotranspiratie.....	81
4.3. Bodemonderzoek.....	87
4.3.1. Indringingsweerstand .....	87

4.3.2.	Wortelonderzoek .....	93
4.3.2.1.	Bewortelingsdiepte.....	93
4.3.2.2.	Relatie tussen de bewortelingsdiepte en de indringingsweerstand van de bodem.....	95
4.3.2.3.	Verticale worteldistributie.....	96
4.4.	<i>Grondwatertafeldynamiek</i> .....	102
4.4.1.	Peilbuismetingen.....	102
4.4.2.	Seizoenale grondwatertafeldynamiek .....	102
4.4.3.	Relatie tussen de grondwatertafeldiepte en de worteldiepte .....	103
4.4.4.	Diurnale grondwatertafeldynamiek en relatie met de FORUG-resultaten.....	108
5.	BESLUIT EN AANWIJZINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK .....	113
6.	LITERATUURLIJST.....	118



## 1. Situering van het project

De Vlaamse kustduinen herbergen een aantal zeer specifieke en zeldzame ecotopen. Hierdoor leveren ze een belangrijke bijdrage tot de regionale en zelfs internationale natuurwaarden. Een combinatie van factoren, gekoppeld aan urbanisatie in functie van de toeristische ontwikkeling, maar ook recreatie en intensieve landbouw hebben het ecosysteem sterk veranderd. De knelpunten die dit vanuit natuurbeschoud en meer bepaald vanuit het interne beheer met zich meebrengt, kunnen rond drie belangrijke thema's worden gesitueerd: 1) verlies aan 'open' ecotopen door verstruweling en vergrassing, 2) verstoring door recreatie en 3) verdroging.

Dit laatste knelpunt vormt de directe aanleiding tot het hier beschreven onderzoek. Verdroging heeft immers geleid tot een sterke achteruitgang van soorten van vochtige duinvalleien. Afgelopen decennia is ook de oppervlakte aan soortenrijke kruidachtige vegetaties van duinvalleien sterk geslonken door verstruweling. In verschillende duingebieden worden daarom gedeelten van het struweel ontgonnen. Hierdoor kunnen kruidachtige vegetaties zich opnieuw ontwikkelen. Voor hogere planten wordt hier bijvoorbeeld gedacht aan *Parnassia* (*Parnassia palustris*), Moeraswespeorchis (*Epipactis palustris*), Bonte paardestaart (*Equisetum variegatum*) en Honingorchis (*Herminium monorchis*).

De hydrologie vormt een cruciale parameter bij dergelijke natuurontwikkeling. Deze factor wordt ondermeer door drinkwaterwinningen sterk beïnvloed, maar staat via evapotranspiratieprocessen ook in nauwe relatie met de vegetatie. Struweelontwikkeling heeft vermoedelijk een belangrijke invloed op de grondwaterstanden. Hierdoor kunnen de beheerseenheden met kruidachtige vegetaties functioneel-ecologisch niet worden losgekoppeld van het omringend struweel. Kennis van het waterverbruik en inzicht in deze processen moeten toelaten om beheerskeuzen in duinvalleien en vooral het uitvoeren en opvolgen van grootschalige ontstruwelingen beter te kunnen onderbouwen.

Het onderzoek zal de invloed van zowel kruid- als struikachtige vegetatie op de hydrologische balans in duinvalleien nagaan. Deze studie vloeit ondermeer voort uit de kennislancunes met betrekking tot het duinecosysteem, zoals in de Ecosysteemvisie voor de Vlaamse kust (1996, Aminal, Afdeling Natuur) werd aangeduid.



## **2. Doelstelling**

De doelstelling van het onderzoek is het kwantitatief inschatten van de evapotranspiratie in verschillende representatieve vegetatietypes (kruid- en struikachtige vegetaties) van vochtige duinvalleien. Vanuit deze gegevens zal de invloed van de vegetatie op de grondwaterbalans worden nagegaan.

Het onderzoek kan worden opgesplitst in drie delen:

1. De verdampingskarakteristieken in verschillende vegetatietypen worden bestudeerd aan de hand van ecofysiologisch onderzoek van geselecteerde representatieve soorten en van metingen op vegetatieniveau.
2. Er wordt onderzoek verricht naar de watertafeldynamiek (laterale en verticale aan- en afvoer van grondwater) onder verschillende vegetatietypen. Het Instituut voor Natuurbehoud (IN) stelt daartoe 15 dataloggers (Van Essen – D-divers) ter beschikking gedurende het vegetatie seizoen 2002.
3. De verdampings- en hydrologische studies zullen worden geïntegreerd. Daarnaast zal er gepoogd worden om de evapotranspiratie te modelleren. De waterbalans onder verschillende vegetatietypen zal worden afgeleid. Het belang van verstruweling voor de hydrologische balans zal worden bepaald.

### **3. Materiaal en methoden**

#### **3.1. Aanduiding van de proefvlakken en de proefsoorten**

De studie wordt uitgevoerd in de noordwestelijke pannen van het Vlaams natuurreservaat De Westhoek (De Panne). Dit gebied wordt gekenmerkt door een relatief natuurlijke hydrologie en vegetatieontwikkeling.

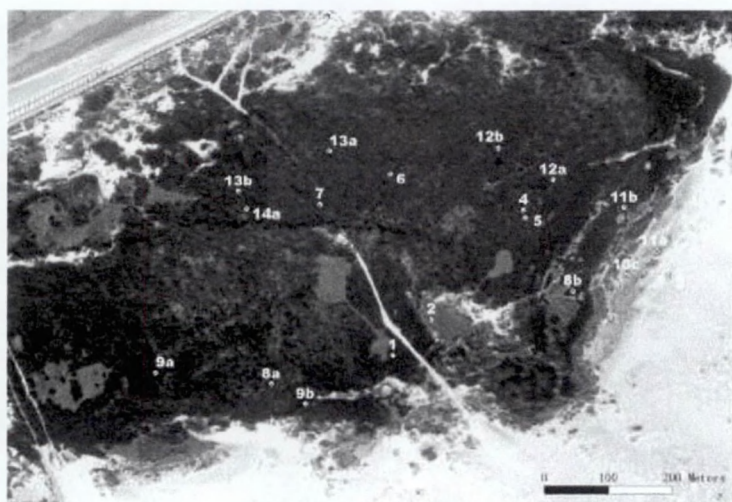
Om het watergebruik van de verschillende vegetatietypes te onderzoeken werden 22 representatieve proefvlakken (straal = 5 m) gekozen. Bij de keuze van deze proefvlakken spelen twee factoren een belangrijke rol, dit zijn de vegetatie en de hoogte van het maaiveld ten opzichte van de grondwatertafel. De proefvlakken werden dan ook uitgekozen naar hun representativiteit, homogeniteit en naar hun hoogte ten opzichte van de grondwatertafel. Wat de vegetatie betreft, zijn de proefvlakken gekozen in typische homogene struik- en kruidvegetaties en in ontstruweelde pannen. Wat de hoogte ten opzichte van de grondwatertafel betreft, werd gepoogd om proefvlakken uit te kiezen die zich op diverse hoogtes boven de grondwatertafel bevinden. Dit gebeurde visueel in het veld en op basis van voorkennis van het terrein.

In Tabel 1 wordt een overzicht gegeven van alle proefvlakken. Hierbij wordt telkens het vegetatietype, de hoogte boven TAW en de gemiddelde grondwaterstand vermeld. De hoogte boven TAW is een gemiddelde waarde van 5 puntmetingen in elk proefvlak opgemeten met een theodoliet. De weergegeven grondwaterstand is telkens een gemiddelde waarde van de opgemeten grondwaterstand tussen april en november 2002 in de betreffende proefvlakken. De ligging van de proefvlakken wordt aangeduid in Figuur 1.



Tabel 1: Overzicht van alle proefvlakken en het type bedekking

Proefvlak	Vegetatietype	Hoogte boven TAW (m)	gemiddelde grondwaterstand (cm onder het maaiveld)
1	Gemengd struweel	5,63	-44
2	Jonge panne	5,31	-14
3	Pionierspanne	5,59	-21
4	Onstruweelde panne	5,17	-27
5	Kruipwilg-Duindoorn struweel	5,23	-33
6	Liguster struweel	5,48	-59
7	Gemengd struweel	5,43	-64
8a	Kruipwilg-Duindoorn struweel	5,28	-30
8b	Kruipwilg-Duindoorn struweel	5,66	-40
9a	Gemengd struweel	5,40	-46
9b	Kruipwilg-Duindoorn struweel	5,92	-92
10a	Pionierspanne	6,33	-76
10b	Jonge panne	5,33	-15
10c	Jonge panne	5,35	-30
11a	Jonge panne met lage Duindoorn	5,36	-24
11b	Jong Duindoorn struweel	5,36	-71
12a	Gemengd struweel	5,25	-49
12b	Gemengd struweel	5,41	-49
13a	Liguster struweel	5,95	-129
13b	Gemengd struweel	5,87	-119
14a	Onstruweelde panne	5,52	-58
14b	Niet begraasde en gemaaide panne	5,22	-24



Figuur 1: Ligging van de proefvlakken



In de proefvlakken werden een aantal representatieve plantsoorten geselecteerd die ecofysiologisch onderzocht werden op hun plant-water relaties. De gekozen soorten zijn modelsoorten van waaruit de evapotranspiratie van de totale vegetatie zal worden gesimuleerd.

Voor de struiken werd geopteerd om volgende soorten te onderzoeken: Kruipwilg (*Salix repens*), Duindoorn (*Hippophae rhamnoides*) en Wilde Liguster (*Ligustrum vulgare*).

De keuze van de te onderzoeken kruidsoorten was aan een aantal voorwaarden onderhevig. De frequentie van voorkomen (constantie) evenals de bedekkingsgraad speelt een rol. Er moest dus worden gezocht naar constante soorten of soorten die een hoge bedekking hebben. Daarnaast moesten de te onderzoeken kruiden voorkomen in vochtige duinvalleien. Er werd gezocht naar planten die zo goed mogelijk de kruidvegetatie kunnen simuleren. Daarom moest zeker een grasachtige, een lage kruidsoort en een hoge kruidsoort worden onderzocht. Bij de keuze speelde naast bovengenoemde ecologische parameters eveneens de technische opmeetbaarheid van de planten een rol. De bladeren moesten immers voldoende groot zijn om ecofysiologische metingen op uit te voeren.

Voor deze keuze werden vegetatieopnames door het IN ter beschikking gesteld. Aan de hand van een TWINSPAN tabel, die vegetatieopnames groepeerde, werd achterhaald welke soorten een hoge bedekking hebben of constant voorkomen.

Na rekening te houden met bovengenoemde ecologische en ecofysiologische voorwaarden werden volgende soorten weerhouden. Duinriet (*Calamagrostis epigejos*) en Gestreepte witbol (*Holcus lanatus*) als representatieve grasachtigen. Gewone waternavel (*Hydrocotyle vulgaris*) en Watermunt (*Mentha aquatica*) als lage kruiden. Grote kattestaart (*Lythrum salicaria*) en Dauwbraam (*Rubus caesius*) als representatieve soorten voor de hoge kruiden.

Tabel 2: Typeplanten van de kruidenvegetatie

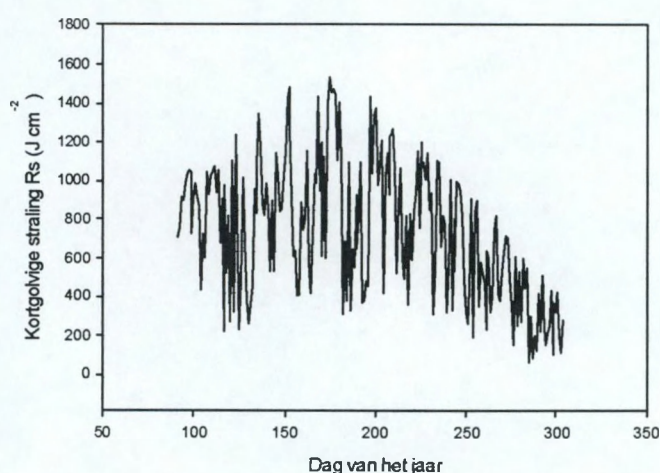
Onderdeel kruidvegetatie	Soort
Grasachtigen	1. Duinriet ( <i>Calamagrostis epigejos</i> ) 2. Gestreepte witbol ( <i>Holcus lanatus</i> )
Lage kruiden	1. Gewone waternavel ( <i>Hydrocotyle vulgaris</i> ) 2. Watermunt ( <i>Mentha aquatica</i> )
Hoge kruiden	1. Grote kattestaart ( <i>Lythrum salicaria</i> ) 2. Dauwbraam ( <i>Rubus caesius</i> )

### 3.2. Meteodata

Om de verdampingskarakteristieken van de verschillende vegetaties in te schatten, is het nodig een aantal parameters van het microklimaat rond de vegetaties te kennen. In het kader van het project is het echter onmogelijk om deze parameters zelf op te meten. Daarom werden de benodigde data aangekocht bij het KMI.

De volgende parameters werden aangekocht voor de periode van april 2002 tot en met oktober 2002: kortgolvlige straling  $R_s$ , luchttemperatuur  $T_l$ , windsnelheid  $u$ , relatieve vochtigheid RH en neerslaggegevens. De kortgolvlige straling werd opgemeten in het KMI-station van Oostende. De andere parameters werden opgemeten in het KMI-station van Koksijde ( $2^\circ 39' \text{ OL}$ ,  $50^\circ 5' \text{ NB}$ , +9m TAW). Wat betreft de neerslaggegevens, kon worden beschikt over 6-uurlijkse waarnemingen. Van de andere parameters waren uurlijkse opmetingen beschikbaar.

In Figuur 2 wordt het seizoensverloop van de dagsommen van de kortgolvlige straling  $R_s$  voor de periode van april tot en met oktober 2002 weergegeven. Hierbij valt op dat de waarden grote fluctuaties vertonen. Dit is te wijten aan de bewolkingsgraad die rechtstreeks een invloed op  $R_s$ -metingen uitoefent. Ondanks de soms grote schommelingen, kan duidelijk een seizoenaal verloop van de dagsommen van  $R_s$  worden waargenomen. De dagsommen van  $R_s$  zijn hoger in de zomer dan in het voor- en najaar.



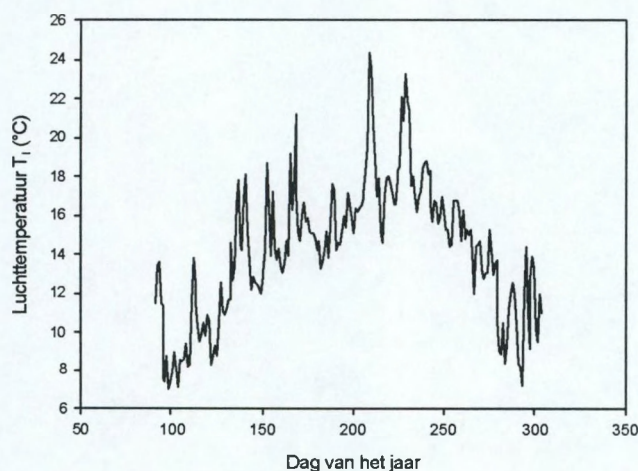
Figuur 2: Seizoenaal verloop van de kortgolvlige straling  $R_s$  voor de periode april tot en met oktober 2002



De gemiddelde luchttemperatuur voor de periode april tot en met oktober 2002 bedraagt 14,2 °C. In Tabel 3 wordt de gemiddelde maandelijkse luchttemperatuur voor de periode april tot november weergegeven.

**Tabel 3: Gemiddelde luchttemperatuur per maand (°C) voor de periode april tot en met oktober 2002**

Maand	Gemiddelde luchttemperatuur $T_1$ (°C)
april	9,8
Mei	12,7
Juni	15,5
Juli	16,6
Augustus	18,1
September	15,2
Oktober	15,3

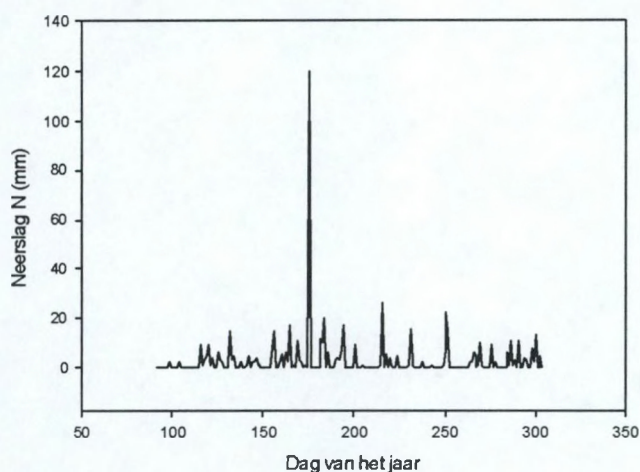


**Figuur 3: Seizoenaal verloop van de gemiddelde luchttemperatuur per dag voor de periode april tot en met oktober 2002**

Uit Figuur 3 blijkt weer duidelijk het seizoenaal verloop. De warmste maand tijdens het groeiseizoen is de maand augustus.

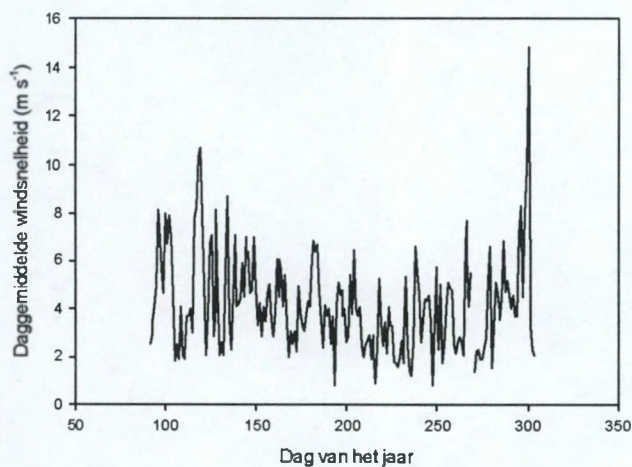
In Figuur 4 wordt het verloop van de 24-uurlijkse neerslag weergegeven voor de periode april tot en met oktober 2002. De peik rond dagnummer 170 wijst op een foute opmeting.





Figuur 4: Seizoenaal verloop van de neerslag per dag voor de periode april tot en met oktober 2002

In Figuur 5 kan men het seizoenaal verloop zien van de dagelijkse gemiddelde windsnelheid. Tijdens de zomerperiode ligt de windsnelheid globaal iets lager dan in het voor- en najaar.



Figuur 5: Seizoenaal verloop van de gemiddelde windsnelheid per dag voor de periode april tot en met oktober 2002

### 3.3. Ecofysiologisch onderzoek

#### 3.3.1. Porometermetingen

##### 3.3.1.1. Theoretische achtergrond

In een eerste fase werd ecofysiologisch onderzoek verricht op bladniveau. De uitwisseling van waterdamp bij planten gebeurt voornamelijk via stomata (huidmondjes) in de bladerdermis. De stomatale weerstand  $r_s$  is de weerstand die de waterdamp ondervindt om de bladeren te verlaten via de stomata. Het opmeten van de stomatale weerstand  $r_s$  geeft een idee over de transpiratiesnelheid op bladniveau.

De stomatale weerstand kan opgemeten worden met een porometer. Het grote voordeel van deze methode is dat de fysiologische variabiliteit en de diurnale dynamiek van de transpiratie kan worden bepaald in relatie tot de klimatologische variabelen bepaald *in situ*. Met een porometer wordt de stomatale weerstand immers gelijktijdig opgemeten met een aantal klimatologische variabelen (lichtintensiteit, blad- en luchttemperatuur, relatieve vochtigheid en PAR, d.i. fotosynthetisch actieve straling). Deze variabelen bepalen de verandering van de stomatale weerstand. Voor een gedetailleerde bespreking over de werking van de porometer wordt verwezen naar Steppe (2001) en Vanden Abeele (2002).

De stomatale weerstand kan gedurende de ganse dag opgevolgd worden. Deze dagverlopen laten toe om voor elk moment van de dag verbanden op te stellen tussen de stomatale weerstand en enkele klimatologische variabelen, zoals temperatuur, zonnestraling, en relatieve vochtigheid. Aan de hand van deze verbanden kan dan de stomatale weerstand buiten de meetperiodes berekend worden.

##### 3.3.1.2. Veldwerk

De stomatale weerstand van de verschillende modelsoorten werd gedurende het groeiseizoen rechtstreeks bepaald met een dynamische diffusieporometer (AP4 porometer, Delta-T Devices, Ltd, Cambridge, UK).

Het was de bedoeling de stomatale weerstand op te volgen gedurende de dag. Naast enkele kortere dagverlopen ( $\pm 7$  uur), werden ook langere dagverlopen opgemeten. Hierbij moest de stomatale dynamiek opgevolgd worden van zonsopgang tot zonsondergang. Dauw verhinderde echter geregeld het opmeten van de stomatale weerstand in de vroege voormiddag (tot ongeveer 10 uur). Daarnaast waren de metingen ook gelimiteerd door de hoge atmosferische relatieve vochtigheid. Het toestel kan immers de stomatale weerstand slechts correct weergeven in een omgeving met een relatieve vochtigheid die lager is dan 80%



(Bragg *et al.*, 1991). Meestal was de relatieve vochtigheid lager dan 80 % in de periode van 10 tot 21 uur (lokale tijd). Tijdens bepaalde meetdagen echter was de relatieve vochtigheid ook in de namiddag (tot 15 uur) hoger dan 80 %.

De porometermetingen werden uitgevoerd in de proefvlakken. Per meetdag werden een aantal soorten opgemeten. Er werden per plantensoort *ad random* enkele representatieve bladeren geselecteerd bij verschillende planten. Om de variatie als gevolg van fysiologische verschillen tussen de bladeren te vermijden, werd getracht zoveel mogelijk dezelfde bladeren op te meten. De bladsteel van de geselecteerde bladeren werd om deze reden gemarkeerd met een stukje plakband. Bij beschadiging van de bladeren werden nieuwe bladeren geselecteerd.

Van Kruipwilg, Duindoorn en Wilde liguster werden bladeren geselecteerd op ongeveer 15 cm van een takuiteinde. Deze takken bevonden zich ongeveer op borsthoogte. Bij de metingen in het begin van het groeiseizoen was het echter niet mogelijk om bladeren op 15 cm van het takuiteinde te nemen omdat enkel de topblaadjes groot genoeg waren om opgemeten te worden. Daarnaast werd ook geprobeerd om bij deze struiksoorten zowel beschaduwde bladeren als bladeren in de volle zon uit te kiezen. Gedurende de dag echter gebeurde het vaak dat beschaduwde bladeren in de volle zon kwamen te liggen en omgekeerd.

Bij Duinriet en Gestreepte witbol werd steeds het tweede blad van bovenaf gemeten. Bij deze twee soorten werd de porometercup steeds evenwijdig met de nerven van het blad geplaatst, op ongeveer 20 cm van het uiteinde van het blad.

Van Gewone waternavel werden relatief grote bladeren geselecteerd ( $\pm 3$  cm diameter).

Ook bij de proefsoort Watermunt werden 3 relatief grote ( $> 15$  cm) exemplaren uitgekozen met stevige bladeren. Bovenaan op elke plant werd dan telkens een voldoende groot en stevig blad geselecteerd.

Bij de proefsoort Grote kattestaart werden eerst en vooral 3 grote ( $> 30$  cm) exemplaren uitgezocht. Vervolgens werd, bovenaan op elke plant, een voldoende groot en stevig blad uitgekozen. De meeste bladeren van Grote kattestaart waren reeds vroeg in het groeiseizoen beschadigd wellicht door insectenvraat. Daardoor was het bijna onmogelijk om niet beschadigde bladeren te kiezen. Bij metingen van dergelijke bladeren werd er steeds voor gezorgd dat de porometercup niet op de gaatjes werd geplaatst.

Voor de proefsoort Dauwbraam werden grote, stevige bladeren uitgezocht ( $\pm 4$  cm diameter) bovenaan de plant.

Van alle soorten werd nagegaan of er al dan niet aan beide zijden van het blad stomata aanwezig zijn. Hierbij werd ook gesteund op de bevindingen van Vanden Abeele (2001). De drie onderzochte struiksoorten zijn hypostomatisch. Ze hebben slechts stomata aan de onderzijde van de bladeren. Dit was ook het geval voor Dauwbraam. Grote kattestaart, Gewone waternavel, Watermunt en Gestreepte witbol zijn amfistomatisch en hebben dus aan



beide zijden van de bladeren stomata. Uit de bevindingen van Vanden Abeele (2001) is gebleken dat Duinriet amfistomatische bladeren heeft. Daarom werd de stomatale weerstand in het begin aan beide zijden van de bladeren opgemeten. De waarden van de stomatale weerstand aan de bovenzijde van de bladeren vielen echter vaak buiten de calibratiecurve van het toestel, waardoor dergelijke waarden onbetrouwbaar waren voor verdere verwerking. Daarom werd van Duinriet de stomatale weerstand enkel aan de onderzijde van het blad opgemeten. Af en toe werd wel nagegaan of de waarden van de stomatale weerstand van de bovenzijde van de bladeren nog steeds buiten de calibratiecurve vielen.

Per proefsoort werden alle bladeren genummerd (van 1 tot 3). Dit nummer werd genoteerd op het stukje plakband dat aanwezig was op de bladsteel. De bladeren werden in een vaste volgorde bemonsterd waarbij altijd eerst de onderkant en dan de bovenkant van het blad werd opgemeten. Na het opmeten van de stomatale weerstand werd, voor elk blad, aan de hand van een ingebouwde PAR quantum sensor, de hoeveelheid geïntercepteerde PAR-straling opgemeten. Hiervoor werd de lichtsensor boven het blad gehouden onder dezelfde hoek van het blad. Na het opmeten van alle bladeren van een bepaalde soort, werd overgegaan naar een volgende proefsoort. De proefsoorten werden altijd in dezelfde volgorde opgemeten. De metingen namen ongeveer een half uur in beslag en werden om het uur uitgevoerd. De porometer werd elk uur, voor de metingen, opnieuw gekalibreerd.

Verspreid over de periode van 15 april 2002 tot 15 september 2002 werden in totaal voor de struiken 22 dagen porometermetingen uitgevoerd. Op die manier werd een totale dataset bekomen van 2303 metingen. De stomatale weerstand van de kruiden werd 25 dagen opgemeten. Zo werd een totale dataset van 1677 porometermetingen verzameld.

#### 3.3.1.3. Verwerking van de porometermetingen

Bij het opstellen van een stomataal weerstandsmodel wordt het verband beschreven tussen de totale stomatale geleidbaarheid van een blad en een aantal meteorologische variabelen (zoals de temperatuur, PAR-straling en het verzadigingsdeficiet van de lucht). De stomatale geleidbaarheid van een blad is de inverse grootte van de stomatale weerstand. In eerste instantie werden de totale stomatale weerstanden van het blad bepaald. Vervolgens werden de opgemeten porometerwaarden voor de relatieve vochtigheid vervangen door de overeenkomstige KMI-gegevens. Daarnaast werden ook de opgemeten PAR-waarden aangepast en werd het verzadigingsdeficiet van de lucht (VPD) berekend.

#### *De stomatale weerstand*

De opgemeten stomatale weerstanden, die buiten de bovengrens van de kalibratiecurve vielen, werden verworpen.

De totale stomatale weerstand van het blad werd als volgt berekend:

$$\frac{1}{r_s} = \frac{1}{r_{s, \text{onder}}} + \frac{1}{r_{s, \text{boven}}} \quad (3.1)$$

Met  $r_s$  = de totale stomatale weerstand van het blad ( $\text{s m}^{-1}$ );  
 $r_{s, \text{onder}}$  = de stomatale weerstand van de onderzijde van het blad ( $\text{s m}^{-1}$ ) en  
 $r_{s, \text{boven}}$  = de stomatale weerstand van de bovenzijde van het blad ( $\text{s m}^{-1}$ ).

Bij hypostomatische planten werd de totale stomatale weerstand gelijkgesteld aan de stomatale weerstand van de onderzijde van het blad. De bovenzijde van het blad bevat immers geen huidmondjes waardoor de stomatale weerstand van de bovenzijde als oneindig groot kan worden beschouwd. De term  $1/r_{s, \text{boven}}$  in formule 3.1 kan dan gelijk gesteld worden aan nul, waardoor  $r_s$  gelijk is aan  $r_{s, \text{onder}}$ .

Wanneer de stomatale weerstand van de onderzijde of van de bovenzijde van het blad buiten de kalibratiecurve viel werd deze weerstand vervangen door de cuticulaire weerstand van het blad. Voor deze waarde werd een weerstand van  $5000 \text{ s m}^{-1}$  (Samson, 2001) aangenomen.

#### *De stomatale geleidbaarheid*

Na het berekenen van de stomatale weerstand ( $r_s$ ) van een blad kon de stomatale geleidbaarheid ( $g_s$ ) als volgt worden bepaald:

$$g_s = \frac{1}{r_s} \quad (3.2)$$

Met  $r_s$  = de totale stomatale weerstand ( $\text{s m}^{-1}$ ) en  
 $g_s$  = de stomatale geleidbaarheid ( $\text{m s}^{-1}$ ).

#### *RH*

De relatieve vochtigheid van de omgeving werd *in situ* opgemeten door de porometer. Aangezien bij dauw een relatieve vochtigheid van 50 % werd opgemeten, werd vermoed dat de porometerwaarden een onderschatting waren van de werkelijke relatieve vochtigheid. De porometerwaarden werden daarom vergeleken met de overeenkomstige KMI-waarden, opgemeten in het meteorologisch station te Koksijde. De vergelijking gebeurde als volgt: wanneer het tijdstip van de porometermeting zich bijvoorbeeld tussen 8:00 en 8:29 bevond, dan werden de porometerwaarden vergeleken met de KMI-waarden van 8 uur. Wanneer het tijdstip zich tussen 8:30 en 9:00 bevond, dan werden de porometerwaarden vergeleken met de KMI-waarden van 9 uur. Na vergelijking bleek dat de opgemeten porometerwaarden steeds kleiner waren dan de overeenkomstige KMI-waarden. Bij de verdere verwerking werd dan ook aangenomen dat de KMI-gegevens een betere inschatting waren van de werkelijke relatieve vochtigheid. De stomatale weerstanden, opgemeten bij een relatieve vochtigheid

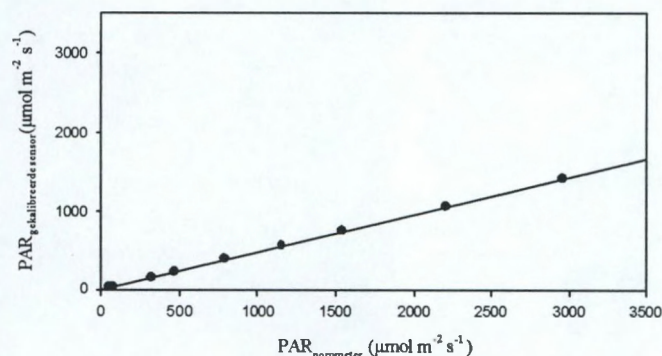


hoger dan 80 %, werden verwijderd aangezien deze gegevens onbetrouwbaar zijn (Bragg et al. 1991).

### PAR

Bij het opmeten van de fotosynthetisch actieve straling (PAR) werden vaak waarden bekomen die hoger waren dan  $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . In België overschrijdt de horizontale instraling echter bijna nooit  $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Vanden Abeele, 2001). Hierdoor werd vermoed dat de opgemeten porometerwaarden een overschatting waren van de werkelijke instraling. Om dit na te gaan werd in het Laboratorium voor Plantecologie een proef opgesteld. Hierbij werd gebruik gemaakt van een gekalibreerde PAR-sensor (QS quantum sensor, Delta-T Devices, Ltd, Cambridge, UK), de lichtsensor van de porometer en een lichtbron waarvan de intensiteit kon worden geregeld. De intensiteit van de lichtbron werd geleidelijk aan verhoogd waarbij de PAR-straling telkens door beide sensoren werd opgemeten. Uit de relatie tussen beide waarden (zie Figuur 6) blijkt dat de opgemeten porometerwaarden ( $\text{PAR}_{\text{AP4}}$ ) inderdaad een overschatting waren van de werkelijke PAR-straling ( $\text{PAR}_{\text{cal}}$ ). Alle PAR-waarden, opgemeten door de porometer, werden dan ook omgerekend aan de hand van de volgende regressievergelijking:

$$\text{PAR}_{\text{cal}} = 0,4765\text{PAR}_{\text{AP4}} + 3 \quad (R^2 = 0,9999) \quad (3.3)$$



Figuur 6: Relatie tussen de PAR-waarden opgemeten door de gekalibreerde sensor en de opgemeten porometerwaarden bij de proef uitgevoerd in het Laboratorium voor Plantecologie

### Verzadigingsdeficiet van de lucht (VPD)

Het verschil in dampdruk tussen de intercellulaire ruimten van het blad en de atmosfeer is de drijvende kracht voor de transpiratie van het blad. Dit verzadigingsdeficiet tussen blad en atmosfeer kan worden berekend aan de hand van de porometergegevens. Toch werd bij het

modelleren de voorkeur gegeven aan het verzadigingsdeficiet van de lucht aangezien gegevens over de bladtemperatuur niet beschikbaar waren voor het groeiseizoen.

Het verzadigingsdeficiet van de lucht (VPD, hPa) wordt als volgt berekend:

$$VPD = e_s - e_a \quad (3.4)$$

Met  $e_s$  = de verzadigde dampspanning bij een gegeven luchttemperatuur tussen 0 en 100°C (hPa) en

$e_a$  = de actuele dampspanning van de lucht (hPa).

Hierbij worden  $e_s$  en  $e_a$  als volgt berekend:

$$e_s = 6,108 \times \exp \frac{(17.27T_a)}{(T_a + 237.3)} \quad (3.5)$$

$$e_a = e_s \times \frac{RH}{100} \quad (3.6)$$

Met  $T_a$  = de luchttemperatuur (°C) en

RH = de relatieve vochtigheid opgemeten door het KMI (%).

### 3.3.2. Stomataal weerstandsmodel

#### 3.3.2.1. Theoretische achtergrond

Voor de stomatale weerstand  $r_s$  van de verschillende plantensoorten zijn slechts discrete veldmetingen voorhanden. Om de actuele evapotranspiratie te kunnen bepalen voor langere tijdsperiodes (vb. een maand, een groeiseizoen) zijn er continue waarden van de stomatale weerstand  $r_s$  nodig. Daartoe zal via een functieverband met andere parameters, waarvan wel continue waarden beschikbaar zijn, de stomatale weerstand  $r_s$  kunnen worden gemodelleerd. De stomatale weerstand  $r_s$  of de geleiding  $g_s$  (met  $g_s = r_s^{-1}$ ) is immers afhankelijk van anatomische karakteristieken van de stomata en varieert gedurende de dag naargelang de respons van de stomata op klimatologische parameters, zoals 1) zonnestraling, 2) atmosferische CO<sub>2</sub>-concentratie, 3) specifiek vochtdeficiet, 4) bladtemperatuur en 5) de waterpotentiaal van het blad (Jarvis, 1976). Jarvis (1976) beschreef de relatie tussen de stomatale geleiding en deze variabelen in een model waarbij de maximale stomatale geleiding



gereduceerd wordt door stressfuncties. Deze stressfuncties worden verondersteld onafhankelijk van elkaar de stomatale geleiding te beïnvloeden. De coëfficiënten van de relaties worden geschat vanuit de velddata. Deze benadering wordt vaak gebruikt (vb. Dolman & Van Den Burg, 1988; Granier & Loustau, 1994; Ogink-Hendriks, 1995; Granier & Bréda, 1996, Samson, 2001). Onderstaand model kan worden gebruikt om de gewasgeleiding  $g_s$  te berekenen:

$$g_s = g_{s,max} \cdot f(\text{PAR}) \cdot f(\Delta q) \cdot f(T_a) \cdot f(\Delta \theta) \quad (3.7)$$

Met  $g_{s,max}$  = maximale stomatale geleiding ( $\text{m s}^{-1}$ );  
 $f(\text{PAR})$  = zichtbare stralingsfunctie;  
 $f(\Delta q)$  = specifieke vochtdeficiet functie;  
 $f(T_a)$  = luchttemperatuur functie en  
 $f(\Delta \theta)$  = bodemvocht deficiet functie.

Alle functies hebben een waarde tussen 0 en 1 omdat ze een reductie veroorzaken ten opzichte van de maximale gewasgeleiding.

Samson (2001) gebruikte vergelijkingen van het Lohammar-type (Lohammar *et al.*, 1980) om de stomatale geleiding te modelleren in functie van licht en specifiek vochtdeficiet van de lucht. Lohammar-type vergelijkingen werden reeds voor verschillende Europese bossen gebruikt (o.a. Halldin *et al.*, 1984; Herbst, 1995; Granier *et al.*, 2000). In de algemene vorm zien de vergelijkingen er als volgt uit:

$$g_s = g_{s,max} \cdot f(R_x) \cdot f(D) \cdot f(\text{LAI}) \cdot f(T_a) \quad (3.8)$$

met:  $g_{s,max}$  = maximale stomatale geleiding ( $\text{m s}^{-1}$ );  
 $f(R_x)$  = stralingsfunctie;  
 $f(D)$  = specifieke vochtdeficiet functie;  
 $f(\text{LAI})$  = bladoppervlakte index functie en  
 $f(T_a)$  = luchttemperatuur functie.

### 3.3.2.2. Modelleren

De volledige dataset met de porometerdata werd zowel voor de kruiden als voor de struiken opgesplitst in telkens twee onafhankelijke datasets. De twee onafhankelijke datasets werden

bekomen door aan de opeenvolgende meetdagen (van de volledige dataset) afwisselend het nummer 1 of 2 toe te kennen. Meetdagen met het nummer 1 werden ondergebracht in een dataset, meetdagen met het nummer 2 werden in een andere dataset ondergebracht. De grootste dataset werd vervolgens telkens gebruikt als parameterset om de parameters van het model in te schatten. De kleinste dataset werd gebruikt als validatieset om het model te evalueren.

Van volgende vergelijkingen werd nagegaan of ze konden worden gefit aan de dataset.

$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{PAR}{(PAR + a)} \cdot (b - c \ln(D)) \quad (3.9)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot (a + bPAR) \cdot (c + dD) - f \quad (3.10)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{PAR}{(PAR + a)} \cdot \exp(-bD) \quad (3.11)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot (a - bPAR) \cdot (c + d \exp(eD)) - f \quad (3.12)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{(PAR + a)}{(PAR + a + b)} \cdot (1 - cD) \quad (3.13)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{(PAR + a)}{(PAR + a + b)} \cdot (1 - cD) \cdot (d + eT_a + fT_a^2) \quad (3.14)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{(b + PAR)}{(a + PAR)} \cdot \frac{1}{1 + c(D - D_0)} \quad (3.15)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{PAR}{PAR + a} \cdot \frac{1}{1 + bD} \quad (3.16)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{aPAR}{PAR + b} \cdot \frac{1}{1 + cD} \quad (3.17)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{aPAR}{PAR + b} \cdot \exp(-cD) \quad (3.18)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{PAR}{PAR + a} \cdot \frac{1 - bD}{1 + cD} \quad (3.19)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot [a(PAR - 1000) + 1] \cdot (1 - bD) \quad (3.20)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot [a(PAR - 1000) + 1] \cdot (1 - bD) \cdot [c(T - 30) + 1] \quad (3.21)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{PAR(1000 + a)}{1000(PAR + a)} \cdot (1 - bD) \quad (3.22)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{PAR}{PAR + a} \cdot [b + (1 - c)d^D] \quad (3.23)$$



$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{PAR}{PAR + a} \cdot [b + (1 - c)d^D] \cdot \frac{(T - T_l)(T_h - T)^a}{(a - T_l)(T_h - a)} \quad (3.24)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{aPAR}{PAR + b} \cdot [c + (1 - d)e^D] \quad (3.25)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot (a + bPAR) \cdot [c + (1 - d)e^D] \quad (3.26)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{PAR(1000 + a)}{1000(PAR + a)} \cdot [b + (1 - c)d^D] \quad (3.27)$$

$$g_s = g_{s,max} \cdot [a(PAR - 1000) + 1] \cdot [b + (1 - c)d^D] \quad (3.28)$$

Met  $g_s$  = de stomatale geleidbaarheid ( $m s^{-1}$ );  
 $g_{s,max}$  = de maximale stomatale geleidbaarheid ( $m s^{-1}$ );  
 $PAR$  = de fotosynthetisch actieve straling ( $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ );  
 $D$  = het verzadigingsdeficiet van de lucht (hPa);  
 $D_0$  = het verzadigingsdeficiet van de lucht bij de maximale stomatale geleidbaarheid (hPa);  
 $T_a$  = de luchttemperatuur ( $^{\circ}C$ ) en  
 $a, b, c, d, e, f$  = parameters bekomen door de vergelijking te fitten aan de dataset in Sigmaplot 7.0.

De vergelijkingen 3.9 tot en met 3.12 werden ontleend aan Samson (2001), de vergelijkingen 3.13 en 3.14 werden overgenomen uit Choudhury *et al.* (1987), vergelijking 3.15 uit Pollet (1997), vergelijkingen 3.16 en 3.17 werden ontleend aan Cienciala *et al.* (1997) en Granier *et al.* (2000), vergelijking 3.18 aan Granier en Loustau (1994), vergelijkingen 3.19 en 3.20 werden overgenomen uit Stewart (1988), vergelijkingen 3.21 tot en met 3.28 werden afgeleid uit Ogink-Hendriks (1995).

Zoals blijkt uit de beschrijving van de verschillende geteste vergelijkingen, omvatten de meeste vergelijkingen geen temperatuursfunctie. Uit het onderzoek van Samson (2001) is immers gebleken dat het incorporeren van een luchttemperatuurfunctie in het model geen verbetering oplevert. Bij de vergelijking van Choudhury *et al.* (1987) werd toch ook de temperatuursfunctie getest (vergelijking 3.14).

De vergelijkingen werden getest voor zowel de verschillende modelsoorten afzonderlijk, als voor de gezamenlijke dataset van de kruiden enerzijds en de struiken anderzijds.

Het fitten van de vergelijkingen aan de dataset gebeurde via niet-lineaire regressie. Hiervoor werd het programma Sigmaplot 7.0 gebruikt. Telkens moesten de beginwaarden van de parameters worden geschat.

## 3.3.2.3. Validering

Na het uitvoeren van de niet-lineaire regressie werd nagegaan in welke mate de bekomen modellen de stomatale geleidbaarheid goed beschrijven. In eerste instantie werd hiervoor nagegaan hoe goed het model de dataset beschrijft. Dit gebeurde aan de hand van de determinatiecoëfficiënt ( $r^2$ ). Een determinatiecoëfficiënt van 1 betekent dat het bekomen model de stomatale geleidbaarheid uitstekend kan voorspellen op basis van de in rekening gebrachte klimaatvariabelen. Op die manier kon reeds een eerste uitspraak gedaan worden over de correctheid van het model.

In tweede instantie werden de bekomen modellen getest met een onafhankelijke validatieset. De op basis van de stomatale modellen gesimuleerde stomatale geleidbaarheden werden uitgezet ten opzichte van de werkelijke stomatale geleidbaarheid. In het ideale geval vallen alle punten dan op de eerste bissectrice. Een visuele weergave van deze verbanden kon op basis van figuren gemaakt worden. De residuals, het verschil tussen werkelijke en gesimuleerde  $g_s$ , werden eveneens geëvalueerd aan de hand van figuren.

Voor een aantal willekeurige meetdagen werden de tijdsverlopen van de gesimuleerde  $g_s$  en de gemeten  $g_s$  uitgezet en vergeleken.

De modellen werden eveneens geëvalueerd aan de hand van enkele statistische criteria. De statistische criteria werden gebruikt om te controleren in welke mate de modelresultaten overeenkomen met de werkelijk opgemeten waarden. Voor de modevaluatie werd gebruik gemaakt van drie statistieken, namelijk de *root mean squared error* (RMSE), de modefficiëntie (ME) en de determinatie coëfficiënt (CD). Deze worden respectievelijk als volgt berekend:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (3.29)$$

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3.30)$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (3.31)$$



Met  $O_i$  = de i-de opgemeten waarde;  
 $P_i$  = de i-de gesimuleerde waarde;  
 $n$  = het totaal aantal metingen in een bepaalde meetperiode en  
 $\bar{\phantom{x}}$  = het gemiddelde van de gemeten waarden.

De RMSE moet geminimaliseerd worden. Deze functie is enkel een schatter van de maximale waarschijnlijkheid als het verschil van de gesimuleerde en de opgemeten waarden normaal verdeeld zijn met een gemiddelde nul en een constante standaardafwijking.

Onder perfecte voorwaarden is de ME gelijk aan één. Aanvaardbare modelsimulaties hebben ME waarden tussen nul en één. Als ME gelijk is aan nul, dan is de gemiddelde geobserveerde een even goede voorspeller dan het model zelf. Als ME kleiner is dan nul, dan blijkt dat de gemiddelde geobserveerde waarde een betere voorspeller is dan het model.

De CD is een maat voor de hoeveelheid van de totale variantie van de geobserveerde data dat verklaard wordt door de modelsimulatie. Het geeft de spreiding aan van de gesimuleerde en geobserveerde waarden rond het gemiddelde van de observaties. Optimaal is de CD gelijk aan één. Een CD groter dan één wijst erop dat de som van de observaties groter is dan de gesimuleerde waarden en dat het model dus een onderschatting is van de werkelijke waarden. Indien de CD tussen nul en één ligt, is de som van de gesimuleerde waarden groter dan de geobserveerde waarden, en is het model een overschatting van de werkelijke waarden. Indien CD niet gedefinieerd kan worden (noemer gelijk aan nul), dan is de gemiddelde observatie een even goede voorspeller dan het model. De CD is gevoelig voor grote fouten en heeft geen bovenlimiet.

Tabel 4 heeft een overzicht van de verschillende mogelijkheden voor de genoemde statistieken.

Tabel 4: Mogelijk gedrag van de statistieken. Met RMSE = *root mean squared error*, ME = *modelefficiëntie* en CD = *determinatiecoëfficiënt*.

RMSE		ME		CD	
RMSE = 0	optimaal	ME = 1	Perfect	CD = 1	$P_i = O_i$
		$0 < ME < 1$	Aanvaardbaar	$0 \leq CD < 1$	$\sum O_i < \sum P_i$
		ME = 0	$\square$ is even goed als model	CD > 1	$\sum O_i > \sum P_i$
		ME < 0	$\square$ is beter dan het model	CD niet gedefinieerd	$\square$ is even goed als model

### 3.3.3. LAI metingen

#### 3.3.3.1. Theoretische achtergrond

Vanuit de transpiratie op bladniveau voor de geselecteerde soorten werd in een volgende fase de verdamping op bestandsniveau voor de verschillende vegetatietypen berekend. Aangezien de gevonden transpiratiesnelheden op bladniveau meestal worden uitgedrukt in g water per m<sup>2</sup> bladoppervlakte per seconde, moet de bladoppervlakte-index voor de verschillende vegetatietypes gekend zijn. Deze bladoppervlakte-index of LAI (*leaf area index*) geeft de totale hoeveelheid bladoppervlakte (aan één zijde gemeten) op een bepaalde bodemoppervlakte weer. Door de verdamping op bladniveau te vermenigvuldigen met de LAI kan de transpiratie op bestandsniveau worden ingeschat.

#### 3.3.3.2. Veldwerk: LAI-metingen en vegetatieopnames

##### *LAI-metingen*

De LAI werd op 2 manieren bepaald: op een destructieve en op een optische wijze. Deze bepalingen gebeurden in het midden van het groeiseizoen (augustus). Op dit moment kan immers worden verondersteld dat de bladoppervlakte maximaal is. Aan de hand van deze maximale LAI-waarde kan het LAI-verloop voor de rest van het groeiseizoen worden voorspeld via een lineaire toename en afname (Samson, 2001). Voor een verdere beschrijving van dit verloop wordt verwezen naar paragraaf 4.2.1.

De destructieve LAI-bepalingen werden uitgevoerd in de periode van 16 augustus tot 4 september 2002. De optische LAI-bepalingen gebeurden op 14 en 15 augustus.

Bij de **destructieve methode** werden voor de struikvegetaties in representatieve homogene vegetaties homogene plots uitgezet met een oppervlakte van 0,25 m<sup>2</sup> (0,50 x 0,50 m<sup>2</sup>). Alle bladeren die zich boven deze oppervlakte bevonden werden geoogst en meegenomen naar het laboratorium. Voor de kruidvegetaties gebeurde hetzelfde in plots met een oppervlakte van 2 m<sup>2</sup> (2 x 1 m<sup>2</sup>). Daarnaast werden voor de kruidvegetatie nog een aantal kleinere plots van 0,25 m<sup>2</sup> (0,50 x 0,50 m<sup>2</sup>) en van 0,40 m<sup>2</sup> (0,20 x 0,20 m<sup>2</sup>) bemonsterd. Op die manier konden op een snellere manier meerdere kruidvegetatietypes destructief bemonsterd worden. In totaal werden er 15 plots destructief bemonsterd.

Bij de destructieve bepaling van de kruidvegetaties in de plots van 2 m<sup>2</sup> was het onmogelijk om alle kiemplantjes en mossen over de volledige oppervlakte te verwijderen. Om deze reden werd de oppervlakte eerst grondig kaal geplukt met uitzondering van kiemplantjes en mossen. In tweede instantie werden dan binnen de grote plot (van 2 x 1 m<sup>2</sup>) een aantal mini-plotjes van 0,01 m<sup>2</sup> (0,10 x 0,10 m<sup>2</sup>) uitgezet die volledig kaalgeplukt werden. Op die manier kon dan via



extrapolatie ingeschat worden wat de bladoppervlakte van de kiemplantjes en de mossen was in het gehele plot van 2 m<sup>2</sup>.

In het laboratorium werd de oppervlakte van de geoogste bladeren bepaald met behulp van de optische bladoppervlakte meter (Li-3000, LI-COR, Nebraska, USA). Bij een grote hoeveelheid bladeren neemt de oppervlaktebepaling met een dergelijke bladoppervlaktetermeter te veel tijd in beslag. In deze gevallen werd de bladoppervlakte onrechtstreeks bepaald aan de hand van het drooggewicht van de geoogste bladeren. Om het drooggewicht om te zetten naar bladoppervlakte werd een omrekeningsfactor (cm<sup>2</sup> bladoppervlak/g drooggewicht) bepaald. Dit gebeurde door van 3 ongeveer gelijke fracties van de bladeren de oppervlakte te bepalen met de bladoppervlaktetermeter alvorens deze te drogen en wegen. De fractie van bladeren die gebruikt werden om de omrekeningsfactor te bepalen was niet steeds even groot. Het minimum drooggewicht van deze fractie bedraagt 3,42 g. Het maximum drooggewicht van de fractie bedraagt 18,12 g. De omrekeningsfactor werd berekend als het rekenkundig gemiddelde van de drie afzonderlijke bepalingen. Het drooggewicht werd bepaald nadat de bladeren ongeveer 24 uur op 50 °C in de droogoven gelegd werden.

Een rekenvoorbeeld van de berekening van de LAI uit de destructieve bepalingen wordt gegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Rekenvoorbeeld bij de destructieve LAI-bepaling voor een Liguster struweel (opp. = 2500 cm<sup>2</sup>)

Plant	Gewicht (g)	Omrekeningsfactor (cm <sup>2</sup> /g)	Bladoppervlakte (cm <sup>2</sup> )	LAI (cm <sup>2</sup> /cm <sup>2</sup> )
Liguster	91,1	75,6	6892,5	2,8
Duinriet	4,1	64,1	259,9	0,1

Indien er mossen werden aangetroffen in de destructieve bepalingen, werden deze ook meegenomen naar het laboratorium. De bladoppervlakte werd steeds integraal van alle mossen bepaald met behulp van de bladoppervlakte meter. Hierbij was het noodzakelijk om de mossen goed uit elkaar te halen en de zandkorrels zoveel mogelijk van de mosplantjes te schudden.

Bij de **optische methode** om de LAI te berekenen werd de zogenaamde inversietechniek gebruikt. De meting gebeurde met behulp van een lineaire PAR-sensor (SunScan, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK) de werking steunt op de interceptie van PAR (fotosynthetisch actieve straling) door de vegetatie. De lichtgevoelige wand van de meetsonde is 1 meter lang en bevat 64 fotodiodes, gelijkmatig verspreid over de volledige lengte. Bij de kruidvegetaties werd steeds gebruik gemaakt van een externe sensor: de Beam Fraction Sensor ("BFS"). Deze sensor is verbonden met de SunScan-sensor en voorzien van twee fotodiodes. De BFS-sensor



werd horizontaal in het proefvlak geplaatst, boven de vegetatie. De pijl, aanwezig op het toestel, werd hierbij naar het noorden gericht. De meest noordelijke fotodiode werd vervolgens afgeschermd van de directe zonnestraling met behulp van een schaduwring. Deze schaduwring werd verschoven ten opzichte van de zon tot de schaduw de schaduwband van de BFS-sensor volledig bedekte. Hierdoor kon zowel de diffuse en als de directe component van de PAR-straling worden bepaald. De meetsonde van de SunScan-sensor werd vervolgens onder de vegetatie geplaatst. Bij elke meting werd de PAR-straling boven (BFS-sensor) en onder (SunScansensor) de vegetatie simultaan opgemeten waardoor de interceptie van de PAR-straling door de vegetatie kon worden bepaald. In de struikvegetaties werd de diffuse en de directe component van de PAR-straling wegens praktische overwegingen bepaald met de SunScan-sensor, zonder gebruik te maken van de BFS-sensor. Daarvoor moest telkens voor iedere meting de directe en diffuse PAR-straling boven de vegetatie met de SunScan-sensor opgemeten worden.

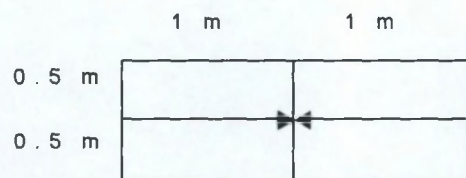
Bij het berekenen van de LAI is ook informatie vereist over de bladhoekverdeling (ELADP, *Ellipsoidal Leaf Angle Distribution Parameter*), de absorptie van het licht door de bladeren binnenin de vegetatie en de zonnehoek. Deze gegevens werden voor het opmeten ingevoerd. Aangezien er geen duidelijke dominantie was van horizontale of verticale bladeren werd voor de parameter ELADP de waarde 1 ingevoerd (User Manual). Er was geen informatie beschikbaar over de absorptie van het licht door de bladeren binnenin de vegetatie. Normalerweise hebben bladeren echter een absorptiewaarde tussen 0,8 en 0,9. Daarom werd als parameter voor de lichtabsorptie de waarde 0,85 ingevoerd (User Manual). Voor het berekenen van de zonnehoek werden de lengteligging, de breedteligging, de locale tijd en het verschil tussen de locale tijd en GMT (*Greenwich Mean Time*) ingegeven.

De optische methode werd toegepast op de plaatsen die destructief bemonsterd werden, alsook volgens een vast schema in alle proefvlakken. In de proefvlakken werden 9 puntmetingen uitgevoerd. De eerste meting gebeurde steeds in het centrum van het proefvlak. De tweede meting gebeurde ten noorden van het centrum, op een straal van 3 m. Indien het wegens de vegetatie niet mogelijk was om op deze straal een meting uit te voeren, werden de metingen op een kleinere straal uitgevoerd. De volgende metingen werden dan op een cirkel in wijzerzin uitgevoerd, telkens onder een hoek van 45° ten opzichte van de vorige meting en het centrum.

De LAI werd telkens bepaald op verschillende hoogtes: 10 cm, 75 cm en 200 cm. Dit zijn tevens de hoogtes van de lagen waarin de vegetatieopnames opgedeeld werden. Op de bodem zelf werd geen meting gedaan omdat het door de vegetatie en het dood hout dikwijls onmogelijk was om de PAR-sensor op de bodem te leggen.

In de destructief bemonsterde kruidenplots werden enkel optische LAI bepalingen uitgevoerd in de grootste plots (2 m<sup>2</sup>). De metingen werden uitgevoerd volgens de lengte-as van de plot en gebeurden steeds vanuit de randen naar het midden van de plot toe (zie Figuur 7).





Figuur 7: Schematische voorstelling van de optische LAI-bepaling in de destructief bemonsterde kruidplots

In de destructief bemonsterde strukplots werd telkens één meting uitgevoerd op de verschillende vermelde hoogtes.

De op beide wijzen berekende LAI-waarden zullen met elkaar worden vergeleken. Hieruit zal een conclusie kunnen worden getrokken naar het gebruik van de optische methode bij LAI-bepalingen.

#### *Vegetatie-opnames*

Voorafgaand aan de destructieve LAI-bemonsteringen werd een vegetatie-opname gemaakt van de monsternameplaats met behulp van de tiendelige Londo-schaal (Schaminée *et al.*, 1995). Van alle proefvlakken (straal = 5 m) in het studiegebied werd eveneens een gedetailleerde vegetatie-opname gemaakt met behulp van de tiendelige Londo-schaal (Schaminée *et al.*, 1995).

Bij het opnemen van de vegetatie werden eerst alle aanwezige soorten opgetekend. De vegetatie werd in de hoogte opgedeeld in 4 lagen: 0 tot 10 cm, 10 tot 75 cm, 75 cm tot 2 m en hoger dan 2 m. Voor alle soorten werd nagegaan in welke vegetatielagen zij voorkomen. Vervolgens werd, per vegetatielaag, de bedekkingsgraad van elke soort geschat en naargelang deze schatting werd een cijfer van 1 tot 10 aan de soort toegekend (1 = 5-15 %, 2 = 15-25 %, ...). Bij een bedekkingsgraad kleiner dan 5 % werden een letter én een cijfer toegekend. De letter staat in verband met de abundantie van de soort (r = 1-5 planten, p = 5-50, a = 50-500 of m = >500). Het cijfer staat opnieuw in verband met de bedekkingsgraad (1 = 1 %, 2 = 2 % en 4 = 3-5 %). De vegetatie-opnames gebeurden op 18 juli, 30 en 31 augustus 2002.

Deze vegetatie-opnames werden uiteindelijk gebruikt om de totale bladoppervlakte per proefvlak te bepalen. Hiertoe werden de destructieve LAI-bepalingen gebruikt. Deze berekende LAI-waarden op basis van de destructieve LAI-bepalingen en de vegetatie-opnames van de proefvlakken werden vergeleken met de optisch bepaalde LAI.

*LAI-bepaling in de 22 proefvlakken op basis van de destructief bepaalde LAI-waarden*

Om de LAI van de proefvlakken te berekenen werd gesteund op de vegetatie-opnames.

In eerste instantie werden de bedekkingspercentages van de aanwezige soorten per laag omgerekend naar oppervlaktes. Tijdens het opnemen van de vegetatie werd steeds per laag een gemiddelde hoogte genoteerd. Aan de hand van deze gemiddelde hoogte en de bedekte oppervlakte per soort kon voor iedere soort ingeschat worden hoe groot het bladvolume ( $V_{\text{species}}$ ) voor iedere laag was:

$$V_{\text{species}} = A_{\text{species}} \cdot h_{\text{species}}$$

Met  $V_{\text{species}}$  = bladvolume van de plantensoort ( $\text{cm}^3$ );

$A_{\text{species}}$  = bedekte oppervlakte van de plantensoort ( $\text{cm}^2$ ) en

$h_{\text{species}}$  = verschil tussen de gemiddelde hoogte van de laag waarin de plantensoort voorkomt en de maximale hoogte van de onderliggende laag (cm).

Hiermee kon eveneens worden geschat wat het totale bladvolume ( $V_t$ ) was:

$$V_t = \sum V_{\text{species},i}$$

Met  $V_t$  = totale bladvolume ( $\text{cm}^3$ ) en

$V_{\text{species},i}$  = bladvolume van soort  $i$  ( $\text{cm}^3$ ).

Per soort werd het aandeel van het bladvolume ( $V_{\text{species}}$ ) in het totale bladvolume ( $V_t$ ) uitgerekend.

$$AV_{\text{species},i} = \frac{V_{\text{species},i}}{V_t}$$

Met  $AV_{\text{species},i}$  = aandeel van soort  $i$  in het totale bladvolume;

$V_{\text{species},i}$  = bladvolume van soort  $i$  ( $\text{cm}^3$ ) en

$V_t$  = totale bladvolume ( $\text{cm}^3$ ).

Voor elke soort werd vervolgens nagegaan welke LAI-waarden uit de destructieve bepalingen konden worden gebruikt. Hierbij werden de destructieve bemonsteringen gebruikt die het best met de vegetatie in het proefvlak overeenkwamen. De beslissingen werden gebaseerd op de opgedane veldkennis.

Uiteindelijk werd de gekozen LAI voor elke soort vermenigvuldigd met het aandeel in het bladvolume  $AV_{\text{species}}$ .



$$LAI_{species,i} \square AV_{species,i} \square LAI_{destr,j}$$

Met  $LAI_{species,i}$  = berekende LAI-waarde van soort i in het proefvlak (-);  
 $AV_{species,i}$  = aandeel van soort i in het totale bladvolume en  
 $LAI_{destr,j}$  = destructief bepaalde LAI-waarde uit gelijkaardige vegetatie als dat van het proefvlak voor een gelijkaardige soort als soort i (-).

Deze waarden werden opgeteld voor alle soorten van het proefvlak om de totale LAI te berekenen:

$$LAI_{tot} = \sum LAI_{species,i}$$

Met  $LAI_{tot}$  = totale LAI-waarde voor het proefvlak (-) en  
 $LAI_{species,i}$  = berekende LAI-waarde van soort i in het proefvlak (-).

In Tabel 6 wordt een rekenvoorbeeld gegeven van een dergelijke LAI-berekening voor een proefvlak in een pionierspanne. In het linker deel van de tabel worden de respectievelijke volumes gegeven van alle soorten voor de aanwezige vegetatielagen. In het rechter deel van de tabel worden in eerste instantie deze volumes per soort opgeteld voor alle lagen. De kolom  $AV_i$  duidt het aandeel van elk soort in het totale bladvolume aan. De kolom  $LAI_{destr}$  geeft de gekozen destructief bepaalde LAI-waarde weer per soort. De totale LAI (in de laatste kolom) wordt verkregen door per soort het aandeel in het totale bladvolume te vermenigvuldigen met de desbetreffende destructief bepaalde LAI-waarde.

Tabel 6: Rekenvoorbeeld van de omzetting van de vegetatieopnamedata naar LAI voor een pionierspanne. Met  $AV_i$  = aandeel van elke soort in het totale bladvolume;  $LAI_{destr}$  = de gekozen destructief bepaalde LAI en  $LAI_{tot}$  = de totale berekende LAI voor elke soort.

soort	> 200 cm	75 - 200 cm	10 - 75 cm	0 - 10 cm	Volume (cm <sup>3</sup> )	AV <sub>i</sub> (-)	LAI destr (-)	LAI tot (-)
gem hoogte			30 cm	8 cm				
	vol (cm <sup>3</sup> )	vol (cm <sup>3</sup> )	vol (cm <sup>3</sup> )	vol (cm <sup>3</sup> )				
Car tri			157080	6	157086	0,035	0,01	0,00
Lyt sal			16	6	22	0,000	0,18	0,00
Sal rep			1570796	251327	1822124	0,408	0,62	0,25
Jun art			1570796	628319	2199115	0,493	0,03	0,02
Pop tre			157080	62832	219911	0,049	0,62	0,03
Sal alb			16	6	22	0,000	0,62	0,00
Phr aus			16	6	22	0,000	6,16	0,00
Amm are			16	6	22	0,000	0,03	0,00
Jun sub			16	6	22	0,000	0,03	0,00
Agr sto				62832	62832	0,014	0,19	0,00
					<b>V<sub>t</sub></b>	<b>4461178</b>		<b>0,30</b>

(Car tri= *Carex trinervis*, Lyt sal= *Lythrum salicaria*, Sal rep= *Salix repens*, Jun art= *Juncus articulatus*, Pop tre= *Populus tremula*, Sal alb= *Salix alba*, Phr aus= *Phragmites australis*, Amm are= *Ammophila arenaria*, Jun sub= *Juncus subnodulosus*, Agr sto= *Agrostis stolonifera*)

Volgens de hier beschreven methode werd aan de destructief bepaalde LAI-waarden een gewicht toegekend op basis van het totale bladvolume per proefvlak en het aandeel van de betreffende soort hierin. Het volgen van deze procedure was noodzakelijk om verschillende redenen. Een eerste reden heeft betrekking op de hoogte van de vegetatie. Het was immers bij de destructieve bemonsteringen onmogelijk om struiken uit alle hoogteklassen systematisch destructief te bemonsteren. Het gebruik van de destructief bepaalde LAI-waarden zou hierdoor voor bepaalde hogere of lagere vegetaties dan de destructief bemonsterde vegetaties een foute inschatting opleveren. Aangezien bij de vegetatieopnames de hoogte per laag was ingeschat, kon effectief een inschatting worden gemaakt over het volume bladeren. Aan de hand van dit volume bladeren kon dan een gewicht toegekend worden aan de destructief bepaalde LAI. Een tweede reden voor het toekennen van gewichten aan de destructief bepaalde LAI-waarden heeft betrekking op het aandeel van de verschillende planten in de proefvlakken. Op die manier kon een groter gewicht worden toegekend aan soorten die een hogere bedekkingspercentage hebben.



### 3.4. Modelleren van de evapotranspiratie

Naast het experimenteel bepalen van parameters, die de evapotranspiratie van struik- en kruidvegetaties beïnvloeden, zal de evapotranspiratie van beide vegetatietypes gemodelleerd worden aan de hand van het vegetatiemodel FORUG. Op deze wijze zal getracht worden het seizoensverloop van de totale evapotranspiratie in te schatten naast het aandeel van de verschillende componenten (struiken, kruiden, bodem, interceptie) in de totale evapotranspiratie.

#### 3.4.1. Modelbeschrijving

De actuele evapotranspiratie zal per vegetatietype en voor de verschillende perioden van het groeiseizoen, alsook voor het gehele groeiseizoen worden geschat met het meer-lagen vegetatieverdampingsmodel FORUG (Samson, 2001; Verbeeck, 2002). Dit model werd ontwikkeld op het Laboratorium voor Plantecologie, Universiteit Gent, en is gebaseerd op het één-laag model van Penman-Monteith (1965). Eén-laag modellen berekenen de transpiratie van een gewas door de gehele kroonlaag te beschouwen als één groot blad, de zogenaamde *big leaf* benadering. Een meer-lagen model daarentegen beschrijft meer de verdeling van de transpiratie tussen de verschillende lagen van het bestand.

Het FORUG-model werd ontwikkeld om de CO<sub>2</sub>- en waterdampuitwisseling tussen gematigde loofbossen en de atmosfeer te beschrijven. Het model is gebruiksvriendelijk en is gebaseerd op fysiologische en fysische theoretische principes.

De structuur van het model is echter vrij flexibel zodat het vrij eenvoudig kan aangepast worden om ook voor een willekeurige vegetatie de koolstof- en waterdampuitwisseling met de atmosfeer te beschrijven.

In dit project wordt enkel de waterverdampingsmodule gebruikt. Hierin wordt voor elke onderscheiden vegetatielaag plus de bodemlaag de beschikbare energie berekend. Uitgaande van de gemiddelde stralingsinterceptie op bladniveau, gecombineerd met een maximale geleidbaarheidswaarde, en een geleidbaarheidsmodel, kan de stomatale geleidbaarheid berekend worden. Combinatie van voorgaande factoren laat toe voor elke onderscheiden laag een energiebalans volgens het Penman-Monteith concept (Monteith, 1965) op te lossen.

Een meer gedetailleerde beschrijving van het model is te vinden in Samson (2001) en Verbeeck (2002).

## 3.4.2. Aanpassing van het FORUG-model

Het FORUG-model werd aangepast voor de berekening van de evapotranspiratie van kruid- en struikvegetaties in de vochtige duinvalleien van de Westhoek. Hiervoor moest eerst een stomataal weerstandsmodel geselecteerd worden. Dit werd reeds beschreven in paragraaf 3.3.2. Daarnaast moesten een aantal parameterwaarden worden aangepast. In Tabel 7 worden aangepaste parameterwaarden voor het FORUG-model weergegeven. Deze waarden werden ofwel ingeschat uit veldwaarnemingen ofwel geschat uit waarden voor andere ecosystemen (voornamelijk bosccosystemen, Samson, 2001).

Tabel 7: Aangepaste parameterwaarden van het FORUG model

Parameter	Symbool	Eenheid	Waarde
Overstromingslengte bladeren struiklaag	$d_c(\text{struik})$	m	0,03
Overstromingslengte bladeren kruidlaag	$d_c(\text{kruid})$	m	0,05
Gemiddelde hoogte vegetatie	$h_{veg}$	m	Afhankelijk van vegetatietype
Nulvlakverplaatsing	$d$	m	$0,64 h_{veg}$
Bodemwarmtefluxfractie (struikvegetatie met kruidlaag)	(-)	(-)	0,03
Bodemwarmtefluxfractie (kruidvegetatie)	(-)	(-)	0,10
Bedekkingsgraad zomer (struikvegetatie met kruidlaag)	$c_s(\text{struik} + \text{kruid})$	(-)	0,93
Bedekkingsgraad zomer (kruidvegetatie)	$c_s(\text{kruid})$	(-)	0,64
Bedekkingsgraad winter (struikvegetatie met kruidlaag)	$c_w(\text{struik} + \text{kruid})$	(-)	0,47
Bedekkingsgraad winter (kruidvegetatie)	$c_w(\text{kruid})$	(-)	0,32
Dikte laag dode bladeren (struikvegetatie met kruidlaag)	-	cm	1,00
Dikte laag dode bladeren (kruidvegetatie)	-	cm	0,33

Aangezien simulaties werden uitgevoerd voor enerzijds kruidvegetaties en anderzijds struikvegetaties met een ondergroei van kruiden, werden indien relevant specifieke parameterwaarden voor kruiden en struiken geselecteerd.

De uiteindelijke simulaties werden uitgevoerd voor een aantal type-kruid- en type-struikvegetaties (zie ook paragraaf 4.2.1.). In eerste instantie werd een simulatie uitgevoerd voor een gemiddelde kruid- en struikvegetatie. Daarnaast werden binnen de kruiden en de struiken de simulaties verder gedetailleerd. Wat betreft de kruiden werden simulaties gedaan voor drie types vegetatie: een pionierspanne, een jonge panne en een ontstruweelde panne.



Voor de struiken werden simulaties gedaan voor vier types: een Kruipwilg-Duindoorn struweel, een Liguster struweel, een gemengd struweel en een jong Duindoorn struweel. Er werd ook nog een simulatie uitgevoerd voor een rietvegetatie omdat het geselecteerde proefvlak in de niet begraasde en gemaaide panne uit een bijna homogene rietvegetatie bestond. Voor deze detailsimulaties moesten specifiek nog een aantal parameters worden aangepast. Hier wordt dieper ingegaan in paragraaf 4.2.1.

Voor parameters niet vermeld in Tabel 7 werden de vooropgestelde parameterwaarden gebruikt zoals vermeld in Samson (2001) en Verbeeck (2002).

De simulaties werden uitgevoerd voor de periode van 2 april (dag 92) tot en met 31 oktober (dag 305), respectievelijk ongeveer overeenkomend met het begin en het einde van het groeiseizoen.

### 3.5. Bodemonderzoek

Om eventuele verschillen in evapotranspiratie te onderscheiden tussen de verschillende vegetatietypes kan de kennis over de beworteling van de verschillende planten een belangrijke bijdrage leveren. Om deze reden werden een aantal bodemparameters onderzocht, de indringingsweerstand, de bewortelingsdiepte en de verticale distributie van de wortels.

#### 3.5.1. Indringingsweerstand

De indringingsweerstand (IW) is een maat voor de weerstand die de bodem kan leveren tegen wortelpenetratie (Ampe, 1999). De ontwikkeling van de vegetatie blijkt in verband te staan met deze indringingsweerstand (vermoortel, 1990). De IW kan opgemeten worden met een prikboor. De diepte tot waar de prikboor in de bodem dringt, geeft een schatting van de diepte waarop horizonten met geringe en sterke indringingsweerstand voorkomen.

De gevolgde werkwijze om een maat voor de indringingsweerstand te bekomen, werd ontleend aan Ampe (1999). Hierbij werd de prikboor eerst met de vlakke hand ("lage weerstand") in de bodem gedrukt. Daarna werd de prikboor met de volle hand ("hoge weerstand") in de bodem gedrukt. Beide weerstandswaarden werden genoteerd. In elk proefvlak werden 9 prikboormetingen uitgevoerd. De eerste meting gebeurde steeds in het centrum van het proefvlak, de andere metingen gebeurden op een straal van 3 m. Indien het wegens de vegetatie niet mogelijk was om op deze straal een meting uit te voeren, werden de metingen op een kleinere straal uitgevoerd. Deze methode is vergelijkbaar met deze aangenomen bij de optische LAI-metingen. De prikboormetingen gebeurden op 12 oktober 2002.

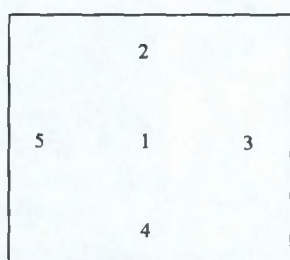
#### 3.5.2. Wortelonderzoek

##### 3.5.2.1. Bewortelingsdiepte en verticale worteldistributie

De bewortelingsdiepte speelt een belangrijke rol bij de watervoorziening van planten. Bij een lage grondwaterstand zijn planten voor een groot deel afhankelijk van de capillaire opstijging. Om een duidelijk beeld te kunnen vormen van de bewortelingsdiepte van verschillende plantensoorten werden wortelboringen uitgevoerd.



Voor wat betreft de struikvegetatie werden er in drie geselecteerde homogene vegetatietypes grondboringen uitgevoerd: Kruiwilg struweel (op borsthoogte), Liguster struweel (2m) en Duindoorn struweel (1,5 m). De wortelboringen voor de kruidvegetaties werden uitgevoerd in een ontstruweelde panne (nabij proefvlak 4), een jonge panne (nabij proefvlak 2) en een grasland (tussen de Parnassia panne en de Herminium panne). Wortelboringen werden ook uitgevoerd in dit laatste vegetatietype (grasland) omdat de wortelboringen in een pionierpanne niet lukten wegens een te ondiepe grondwatertafel. Per vegetatietype werden volgens een vast schema op 5 punten een boring uitgevoerd. Eén boring gebeurde centraal, de andere boringen gebeurden op een afstand van 3 m van dit punt. Dit wordt schematisch voorgesteld in Figuur 8.



**Figuur 8: Schematische ruimtelijke voorstelling van de wortelboringen**

Met behulp van een grondboor (diameter = 8 cm) werden telkens grondkolommen met een hoogte van 15 cm uitgeboord. De bovenste kolom werd verdeeld in drie zones (telkens met een hoogte van 5 cm). De diepere grondkolommen werden telkens in twee zones verdeeld. De diepte van de boring werd bepaald door de diepte van de wortels. Als er in de boring geen wortels meer te zien waren, werd nog één boring uitgevoerd. Dikwijls werd dieper boren verhinderd door de aanwezigheid van de geondwatertafel. Hierdoor kon immers de grondkolom niet meer worden bovengedaald. Het opgeboorde materiaal werd per zone in plastic zakjes gestopt en meegenomen naar het laboratorium. De grondmonsters werden in de diepvries (18 °C) bewaard.

De wortelboringen werden uitgevoerd op 3, 4 en 10 oktober 2002.

Na het ontdooien, werden de bodemstalen gedurende twee dagen in een droogoven (50°C) geplaatst. De stalen werden vervolgens gewogen en gezeefd op een zeef met water (maaswijdte 0.5 mm). Na het zeven bleven enkel het organisch materiaal en de wortels over. Om beide fracties beter te kunnen scheiden werden, met behulp van een pincet, de wortels en het organisch materiaal overgebracht in een maatbeker, die gevuld was met water. Na verloop van tijd bezonk een deel van het organisch materiaal waardoor de wortels gemakkelijker van het overblijvende organisch materiaal konden worden gescheiden. Deze methode werd gebaseerd op een werkwijze, gevolgd door Schuurman en Goedewagen (1965).

Aangezien de verwerking van de opgegraven bodemstalen veel tijd in beslag nam, konden per proefvlak de bodemstalen van slechts 2 meetpunten worden onderzocht (meting 2 en meting 4). Om dezelfde reden werden voor de kruidvegetaties ook enkel de bodemstalen van de jonge en de ontstruweelde panne verwerkt. De wortels werden daarna in papieren zakjes gestopt, voorzien van een merkteken en in de droogoven (50°C) geplaatst gedurende minimum 2 dagen.

Vervolgens werden, per boring, de wortels in 2 fracties verdeeld naargelang de worteldikte. Hierbij werden de dikkere wortels (fractie 1) gescheiden van de fijnere wortels (fractie 2). Het onderscheid tussen beide fracties gebeurde op visuele basis. De fijnere wortels werden dan op een zeef met een maaswijdte van 2 mm gebracht om het wortelmateriaal te scheiden van het resterende zand en de organische materiaalresten. Deze fracties werden vervolgens gewogen op een analytische balans (Mettler, Zürich, Zwitserland). Per bodemlaag werd ook het bemonsterde bodemvolume berekend. Aan de hand van deze gegevens kon dan de wortelmassa ( $\text{g m}^{-3}$ ) per bodemlaag worden berekend en het percentage van deze wortels ten opzichte van de totale opgegraven wortelmassa. Bij deze wortelmassa per bodemlaag gaat het dus steeds over het drooggewicht van de wortels.

#### 3.5.2.2. Indringingsweerstand

Op de plaatsen van de wortelboringen werden eveneens half oktober prikboormetingen uitgevoerd. Deze metingen moeten een idee geven in welke mate de beide metingen aan elkaar kunnen gerelateerd worden.



### 3.6. Grondwatertafeldynamiek

#### 3.6.1. Achtergrond en doelstellingen

Meyboom (1967) toonde aan dat de grondwatertafel onder phreatofyten een typisch diurnaal verloop vertoont. Gedurende de dag, als de evapotranspiratie hoog is, daalt het grondwaterpeil. Dit komt volgens Meyboom (1967) doordat het grondwater wordt aangezogen in de onverzadigde zone. 's Nachts stijgt het grondwaterpeil terug. De daling in de evapotranspiratie zorgt er dan immers voor dat de verzadigde zone weer kan worden aangevuld en de grondwatertafel opnieuw stijgt. Het grondwaterpeil begint te dalen tussen 9 en 11 u in de voormiddag, bereikt een minimum tussen 19 en 21 u, waarna het terug begint te stijgen tot 9 – 11 u de volgende morgen. In de studie van Meyboom (1967) wordt de dagelijkse hoeveelheid grondwater, die gebruikt wordt voor evapotranspiratie, afgeleid uit deze diurnale grondwatertafel fluctuaties.

De doelstelling was dan ook om de evapotranspiratie af te leiden uit de grondwatertafeldynamiek. Deze waarden worden dan vergeleken met de resultaten van het FORUG model.

#### 3.6.2. Peilbuismetingen

In het centrum van elk van de 22 proefvlakken werd in april een geperforeerde peilbuis geplaatst. De bedoeling hierbij was om de grondwatertafel dynamiek gedurende het groeiseizoen op te volgen. Het Instituut voor Natuurbehoud (IN) stelde daartoe 15 dataloggers (Van Essen – D-divers) ter beschikking. Eén van deze dataloggers werd gebruikt om de luchtdruk op te meten. Deze druk wordt opgemeten om de dataloggermetingen te corrigeren. De dataloggers registreren immers zowel de luchtdruk als de druk veroorzaakt door het water. De datalogger die de atmosferische druk opmeet, werd geïnstalleerd in een droge peilbuis op een duintop in het studiegebied. Er werden 7 proefvlakken uitgekozen met een representatieve vegetatie, waar een datalogger de grondwatertafel gedurende het volledige groeiseizoen opvolgt. De overige 7 dataloggers werden verdeeld over de overige proefvlakken. Elk van deze overige 7 dataloggers werd toegewezen aan 2 of 3 proefvlakken. Om de 3 weken werden deze dataloggers dan naar het andere proefvlak verplaatst. Ongeveer om de 6 weken werden de data afgehaald uit de dataloggers. Bij het afhaken en het verplaatsen van de dataloggers werd het grondwaterpeil manueel opgemeten.

De dataloggers registreren het grondwaterpeil om de 30 minuten.

Om de luchtdrukinvloeden op de meetresultaten volledig uit te schakelen, moeten de data gecompenseerd worden met de overeenkomstige luchtdrukdata. De compensatie houdt in dat per meting de atmosferische druk (droge logger) wordt afgetrokken van de waterdruk. Deze gecompenseerde meetwaarden kunnen dan verder gecorrigeerd worden met een vaste waarde. Deze extra correctie houdt in dat een gecompenseerde waarde op een bepaald tijdstip gelijk gesteld wordt aan een met de hand opgemeten waarde. De extra correctiewaarde die hieruit wordt bekomen, kan dan worden gebruikt om alle andere gecompenseerde waarden te corrigeren. In Tabel 8 wordt een voorbeeld gegeven van een dergelijke compensatie met barometerdata en een extra correctie met een handmeting.

**Tabel 8: Rekenvoorbeeld van een compensatie met atmosferische drukdata en een extra correctie met een handmeting**

Datum	Tijd	$P_{\text{water}}$ (cm)	$P_{\text{atm}}$ (cm)	$P_{\text{water}} - P_{\text{atm}}$ (cm)	Handmeting (cm)	Diepte GWT (cm)
22/05/02	10:00	110	50	60	-200	-200
22/05/02	10:30	110	40	70		-190
22/05/02	11:00	130	60	70		-190
22/05/02	11:30	130	70	60		-200

In het rekenvoorbeeld in Tabel 8 werd een handmeting gedaan op 22/05/02 om 10:00 met een waarde van -200 cm. In het voorbeeld betekent dit dat een waarde van 60 overeen komt met -200 cm. Er is dus een correctiewaarde nodig van -260. Vervolgens kunnen dan ook de andere gecompenseerde waarden gecorrigeerd worden met dit getal.

Deze compensatie voor de luchtdruk en extra correctie met handmetingen gebeurde voor alle peilbuisdata.

### 3.6.3. Seizoensale grondwatertafeldynamiek

In eerste instantie werden alle peilbuisdata na compensatie en extra correctie met handmetingen uitgezet in functie van de tijd.

### 3.6.4. Relatie tussen de grondwatertafeldiepte en de worteldiepte

De resultaten uit het wortelonderzoek (zie 4.3.2.) werden gerelateerd aan de diepte van de grondwatertafel gedurende het groeiseizoen. Hierbij was het de bedoeling om na te gaan of er



eventueel voor bepaalde vegetaties of bepaalde plantensoorten een tijdelijk watertekort is opgetreden gedurende het groeiseizoen.

### 3.6.5. Diurnale grondwatertafeldynamiek en relatie met de FORUG-resultaten

Naar aanleiding van het onderzoek van Meyboom (1967) was het de bedoeling om de evapotranspiratie te berekenen aan de hand van de dagelijkse grondwatertafel schommelingen. Daartoe moesten eerst tijdszones worden uitgekozen waarbij de grondwatertafel schommeling niet het gevolg was van neerslag~~influx~~. Hiertoe werden de neerslagdata van het KMI (opgemeten in Koksijde) gebruikt. Voor de periode van april tot en met oktober werd nagegaan wanneer er neerslag viel. In totaal waren dit 123 dagen van de 214 dagen. Van deze dagen, evenals van de dagen nadat er neerslag gevallen is, konden de grondwatertafeldata niet worden gebruikt om de evapotranspiratie te berekenen. De schommeling van de grondwatertafel kan dan immers ook het gevolg zijn van een *influx* van regenwater. Uiteindelijk bleven op die manier slechts 49 eventueel bruikbare dagen over, waarbij slechts een gering aantal dagen deel uitmaakt van een aaneengesloten droge periode. Van deze dagen werd nagegaan welke wel tot een langere droge periode behoorde en werd de evapotranspiratie berekend volgens Meyboom (1967). Hierbij werd de methode van White (1932) gebruikt. Deze stelde volgende vergelijking voor om de totale hoeveelheid grondwater te berekenen, die wordt benut voor de evapotranspiratie gedurende 24 uur:

$$q = y \cdot (24r \pm s) \quad (3.32)$$

Met  $q$  = diepte van het water weggenomen uit een infinitesimale ruimte (cm);  
 $y$  = *specific yield* van de bodem (%);  
 $r$  = uurlijkse snelheid van grondwaterinstroom ( $\text{cm u}^{-1}$ ) (kan gevonden worden uit de stijging van de grondwatertafel tussen middernacht en 4 uur of tussen 2 en 6 uur, afhankelijk van de duur van de daling van de grondwatertafel) en  
 $s$  = de netto stijging of daling van de grondwatertafel gedurende 24 uur (cm).

De onbekenden in het rechterlid van deze vergelijking, met uitzondering van  $y$ , kunnen worden berekend aan de hand van de grondwatertafel data. De *specific yield*  $y$  van de bodem is de verhouding tussen (i) het volume water dat een verzadigde bodem zal verliezen door de zwaartekracht en (ii) het volume van de bodem. Aangezien Meyboom (1967) vermeldt dat deze waarden moeilijk te meten zijn, werd in het kader van dit onderzoek een literatuurwaarde genomen. Volgens Meyboom (1967) moet de *specific yield*  $y$  van de bodem gedeeld worden door twee om gebruikt te worden in de formule van White (3.23). Hij stelt dan ook een

waarde van 10 % voor voor fijn zand (Meyboom, 1967). Deze waarde werd gebruikt in de berekeningen.

De berekende waarden voor de verschillende proefvlakken werden vergeleken met de evapotranspiratiewaarden bekomen uit het FORUG-model.

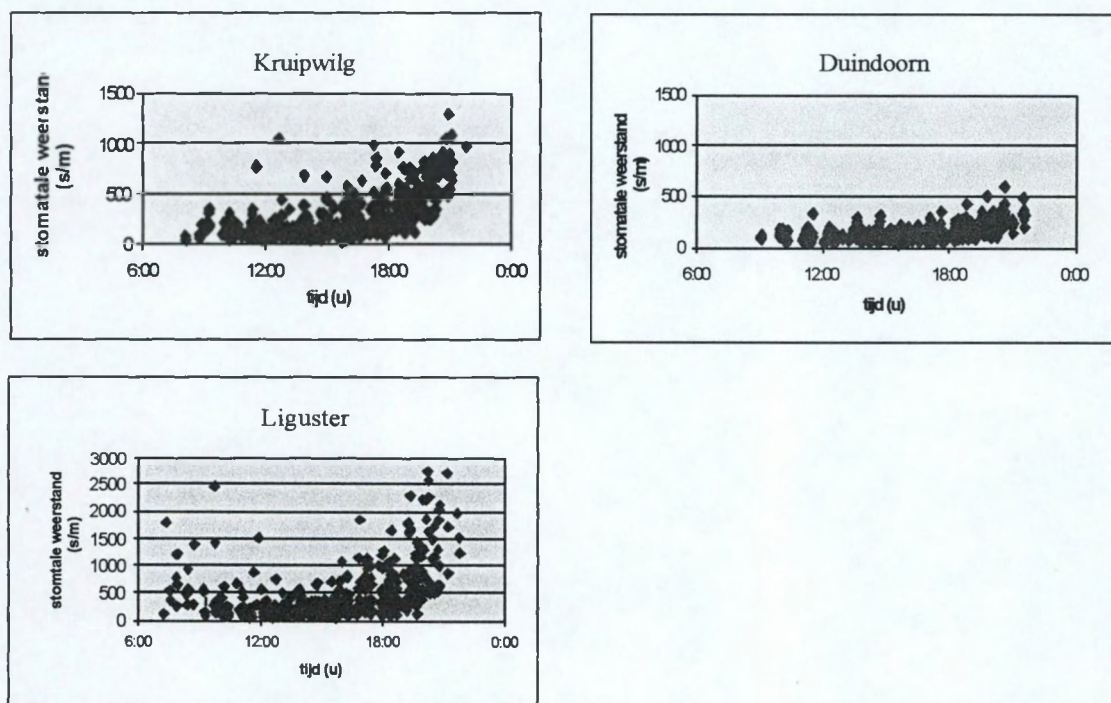


#### 4. Resultaten en bespreking

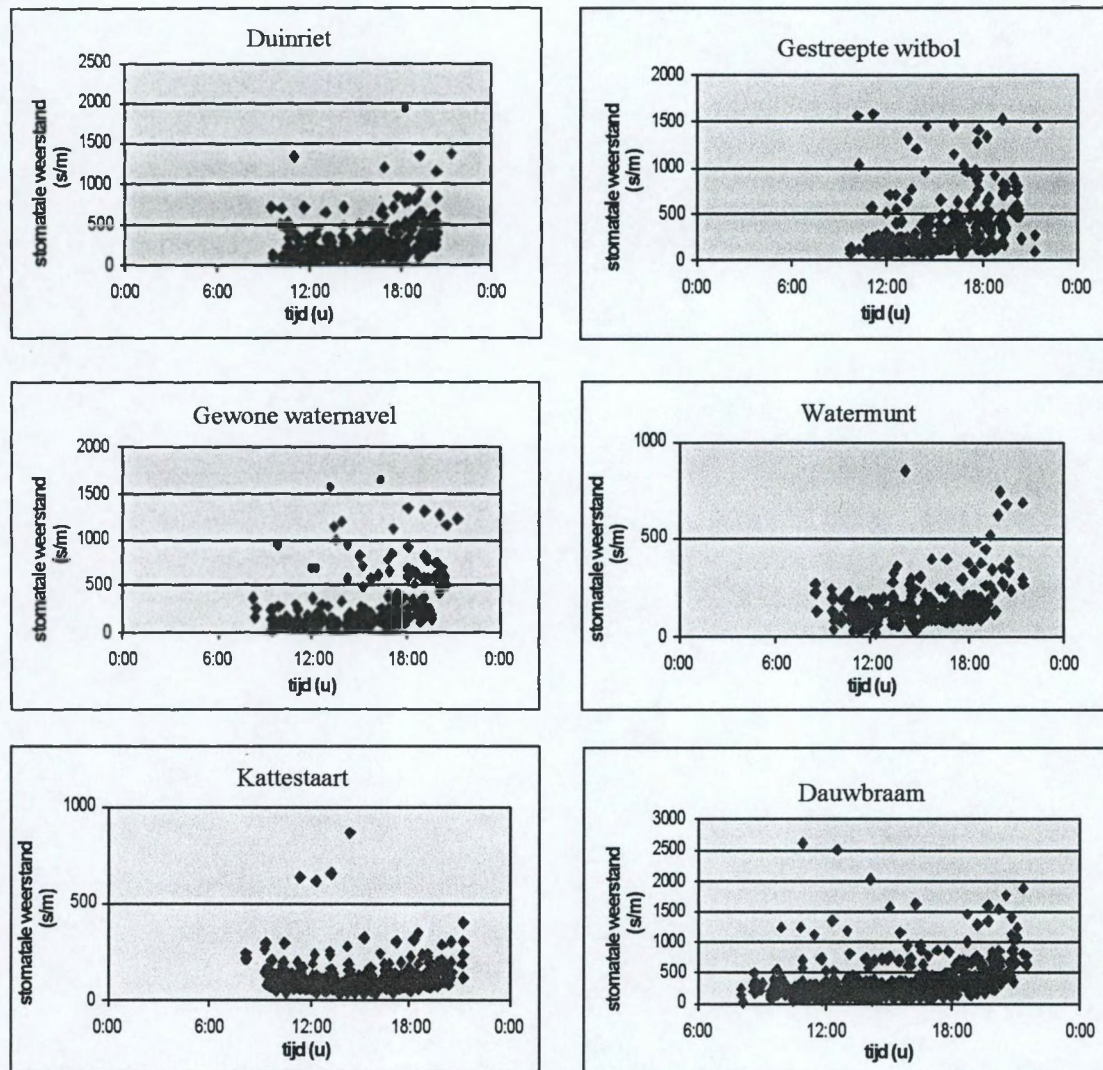
##### 4.1. Ecofysiologisch onderzoek

###### 4.1.1. Porometermetingen

Alle data van de verschillende meetdagen werden per soort samengevoegd. De grafieken die hieruit opgemaakt werden, tonen een diurnaal verloop van de stomatale weerstand. 's Morgens en 's avonds is de stomatale weerstand hoog. Normalerweise worden minimale waarden van de stomatale weerstand gevonden rond de middag. Eventueel kan in het midden van de dag als gevolg van een tijdelijk watertekort in de plant sluiting van de stomata optreden. Dit resulteert in een plotse stijging van de stomatale weerstand. Dit diurnaal verloop wordt voor de verschillende soorten weergegeven in Figuur 9 en Figuur 10. In Figuur 11 worden een aantal typische dagverlopen van de stomatale weerstand weergegeven.



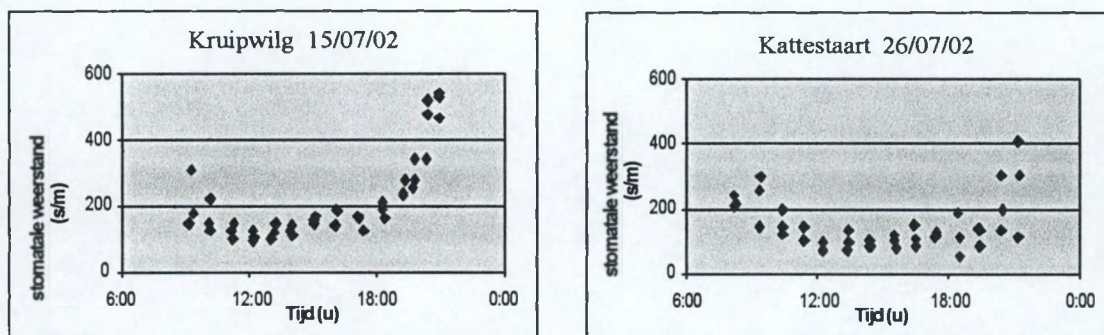
Figuur 9: Diurnaal verloop van de stomatale weerstand van de 3 struiken: Kruipwilg, Duindoorn en Liguster



Figuur 10: Diurnaal verloop van de stomatale weerstand van de kruiden

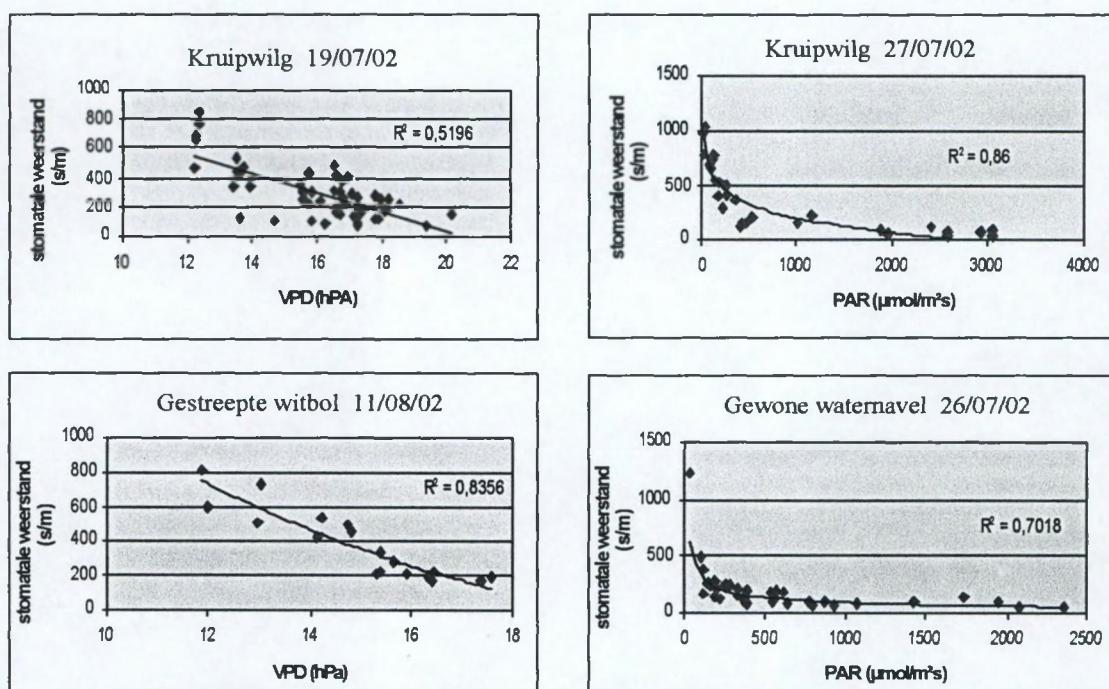
Uit Figuur 9 en Figuur 10 blijkt dat er een grote spreiding kan waargenomen worden op de opgemeten stomatale weerstandswaarden. Dit blijkt ook uit Figuur 11. In deze figuur worden twee dagverlopen weergegeven, waarbij er uurlijks drie herhalingen op verschillende planten gebeuren. Bij deze herhalingen kan worden vastgesteld dat er soms een grote spreiding op de opgemeten waarden zit.





Figuur 11: Typisch dagverloop van de stomatale weerstand van Kruipwilg en Kattestaart

Per onderzochte plantensoort werden ook de relaties tussen de stomatale weerstand en de opgemeten klimatologische variabelen nagegaan. Enkele van de gevonden relaties worden weergegeven in Figuur 12.



Figuur 12: Voorbeelden van het verband tussen enerzijds het verzadigde dampdrukdeficiet (VPD) en de stomatale weerstand en anderzijds de fotosynthetisch actieve straling (PAR) en de stomatale weerstand

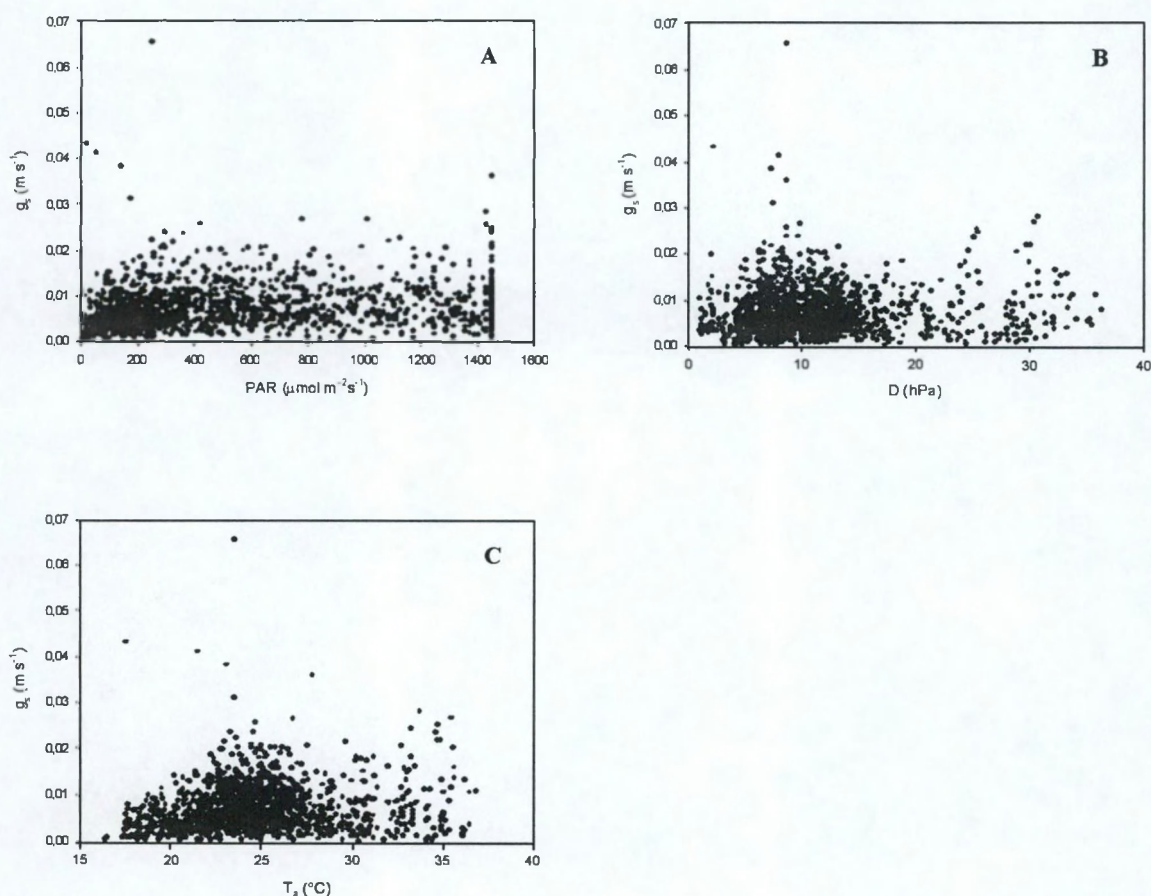
Er moet echter wel worden opgemerkt dat de hier voorgestelde verbanden van de stomatale weerstand in functie van de tijd (Figuur 11), het verzadigde dampdrukdeficiet en de fotosynthetisch actieve straling (Figuur 12) niet frequent voorkwamen. In dit stadium van het onderzoek kon dus reeds vermoed worden dat het opstellen van een stomataal weerstandsmodel in functie van de klimatologische variabelen (PAR, VPD) niet evident zou zijn.



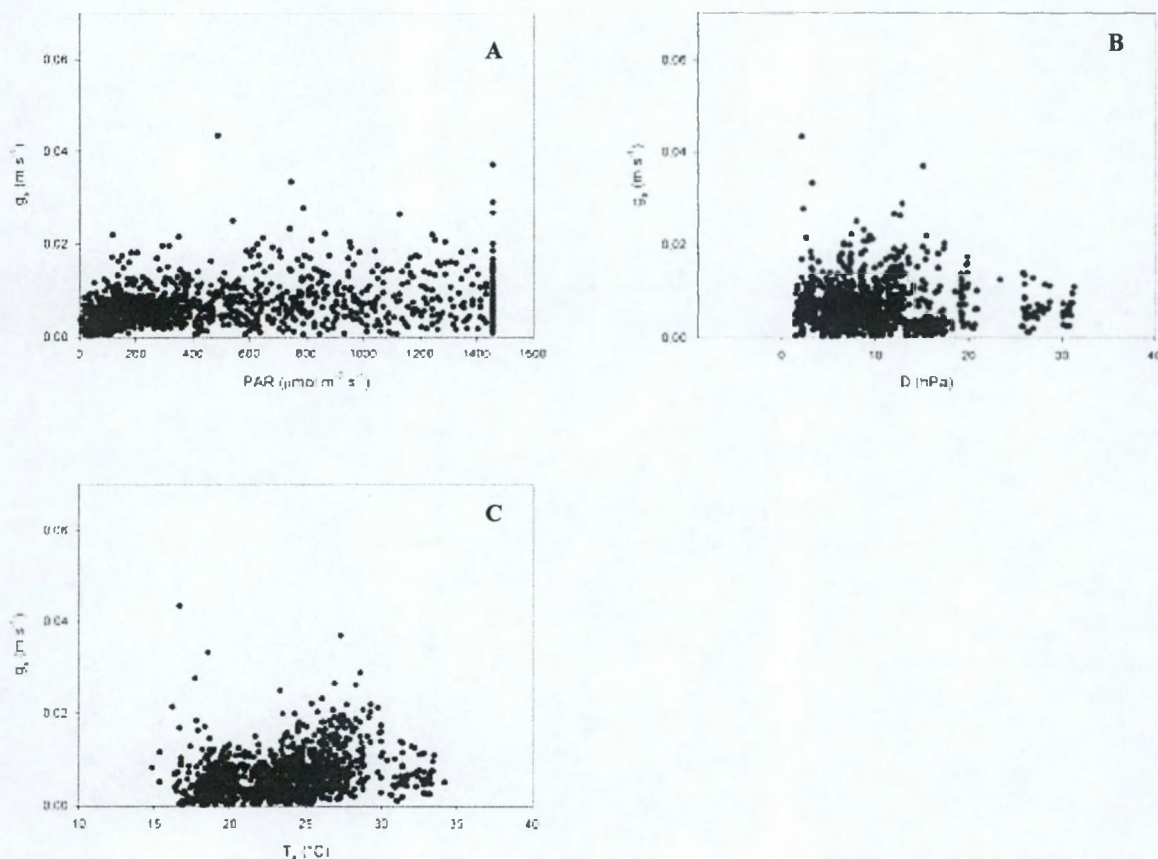
#### 4.1.2. Stomataal weerstandsmodel

##### 4.1.2.1. Modelling

Bij het zoeken naar een stomataal model werden de verschillende modellen, vermeld in paragraaf 3.3.2., uitgetest op de kruidenset, de struikenset en op de datasets met de afzonderlijke modelsoorten. Om  $g_{s,max}$ , de maximale stomatale geleidbaarheid, te achterhalen, werden eerst alle data uitgezet in functie van de verschillende klimaatvariabelen. Dit wordt weergegeven in Figuur 13 en Figuur 14 voor respectievelijk de kruiden en de struiken.



Figuur 13: Scatterdiagram met het verband tussen de stomatale geleidbaarheid en (A) PAR, (B) verzadigingsdeficit van de lucht en (C) de luchttemperatuur voor de volledige kruiddataset



Figuur 14: Scatterdiagram met het verband tussen de stomatale geleidbaarheid en (A) PAR, (B) verzadigingsdeficiet van de lucht en (C) de luchttemperatuur voor de volledige struikdataset

Uit deze figuren kunnen een aantal globale verbanden worden afgeleid tussen de stomatale geleidbaarheid en de opgemeten klimatologische verbanden. Bij een lage PAR-intensiteit zal de stomatale geleidbaarheid laag zijn. Indien de PAR-intensiteit stijgt, neemt de stomatale geleidbaarheid zeer vlug toe tot aan een maximumwaarde, die niet meer wordt beïnvloed door hogere PAR-waarden. De stomatale geleidbaarheid neemt toe met een stijgend verzadigingsdeficiet van de lucht. Indien echter het verzadigingsdeficiet van de lucht te groot wordt ( $> \pm 10$  hPa), neemt de stomatale geleidbaarheid opnieuw af. Verder kan worden afgeleid dat de stomatale geleidbaarheid meestal zal toenemen bij een stijgende temperatuur. Indien de temperatuur echter hoger wordt dan  $\pm 25^{\circ}\text{C}$  zal de stomatale geleidbaarheid opnieuw afnemen. Toch is het wel zo dat er een grote spreiding op de  $g_s$ -waarden te zien is. Hierdoor kon reeds vermoed worden dat het niet evident zou zijn om een model te fitten aan de datasets op basis van de opgemeten klimaatvariabelen.



De maximale stomatale geleidbaarheid  $g_{s,max}$  die werd gebruikt bij het modelleren wordt weergegeven in Tabel 9. Als maximale waarde voor de stomatale geleidbaarheid werd hierbij telkens de maximale waarde genomen die opgemeten werd. Deze waarden zijn groot in vergelijking met de waarden die in de literatuur worden vermeld. Wel is het zo dat de gevonden waarden steeds opgemeten werden in andere ecosystemen en op andere plantensoorten. Dolman en Van Den Burg (1988) vonden  $g_{s,max}$  waarden voor Eik tussen 0,0053 en 0,0106  $m s^{-1}$ . Kelliher *et al.* (1995) rapporteerden voor een gematigd loofbos een  $g_{s,max}$  van  $0,0046 \pm 0,0017 m s^{-1}$ . Samson (2001) meette  $g_{s,max}$  waarden voor Es van 0,0093  $m s^{-1}$ , voor Beuk (21 m) van 0,0057  $m s^{-1}$  en voor Esdoorn van 0,0026  $m s^{-1}$ . Ogink-Hendriks (1995) vond voor Eik een  $g_{s,max}$  van 0,0111  $m s^{-1}$ .

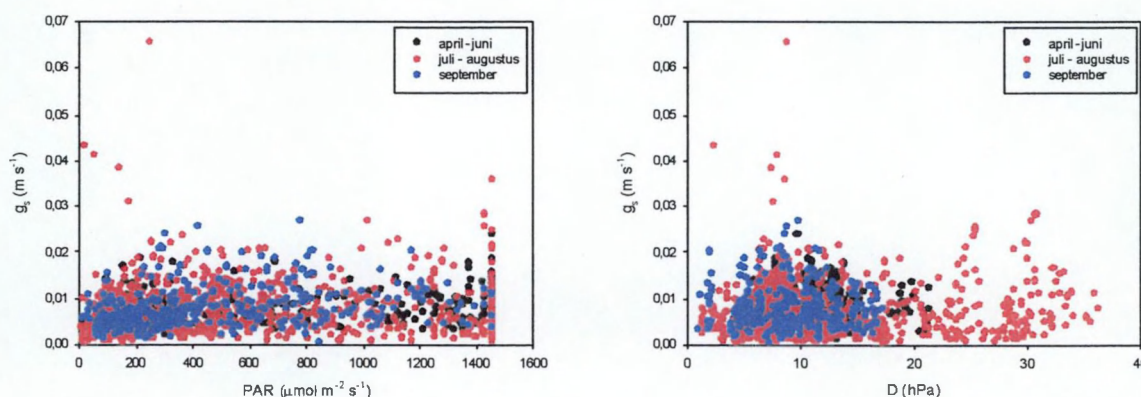
Tabel 9: Maximale stomatale geleidbaarheid

Dataset	$g_{s,max} (m s^{-1})$
Kruiden	0,0655
Struiken	0,0435
Duinriet	0,0200
Gestreepte witbol	0,0197
Gewone waternavel	0,0282
Watermunt	0,0655
Grote kattestaart	0,0310
Dauwbraam	0,0431
Wilde liguster	0,0370
Kruipwilg	0,0435
Duindoorn	0,0290

Na het selecteren van de maximale stomatale geleidbaarheid werden via niet-lineaire regressie de modellen 3.9 tot en met 3.28 aan de datasets gefit. In eerste instantie werden geen temperatuursfuncties geïncorporeerd in de modellen. Pas in een tweede stadium werden ook temperatuursfuncties onderzocht. Primair werd na elke niet-lineaire regressie de determinatiecoëfficiënt  $r^2$  geëvalueerd. Hierna worden eerst de resultaten voor de kruiddataset en de struikdataset behandeld.

Uit de stomatale modellering voor de kruiddataset kan het volgende afgeleid worden. Zoals uit de scatterdiagrams (Figuur 13) reeds vermoed werd, blijkt dat er geen enkel model met een hoge  $r^2$  waarde aan de dataset kan worden gefit. De maximale  $r^2$  waarde die hierbij werd gevonden is 0,07. Het incorporeren van een temperatuursfunctie in het stomataal weerstandsmodel leverde geen verbetering op, integendeel werd hierbij een maximale  $r^2$  gevonden van 0,04. Zoals uit de scatterdiagrams naar voren kwam, kan de keuze van de maximaal opgemeten stomatale geleidbaarheid als  $g_{s,max}$  betwist worden. Deze waarden zouden immers ten opzichte van de dataset als *outliers* kunnen beschouwd worden. Daarom werden dezelfde modellen (3.9 tot en met 3.28) getest met een andere  $g_{s,max}$ . Deze werd ingeschat op basis van het scatterdiagram. Als  $g_{s,max}$  werd voor de kruiddataset de waarde

0,0360 genomen. Doch kon ook deze aanpassing geen betere modellen opleveren. De maximale  $r^2$  bedraagt 0,08. De oorzaak van deze slechte correlatie is te wijten aan de spreiding op de dataset. Vandaar dat werd nagegaan waardoor deze spreiding er was. Een hypothese die hierbij naar voor kwam, was dat het stomataal apparaat misschien anders reageert in functie van het moment in het groeiseizoen. Daarom werd de kruiddataset opgeplitst in drie deelsets: porometermetingen van (i) april tot en met juni (lenteperiode), (ii) juli en augustus (zomerperiode) en (iii) september (herfstperiode). Door opnieuw dezelfde scatterdiagrammen te maken, kon echter worden gezien dat niet alle spreiding op de data kon worden gerelateerd met een verschillende reactie van  $g_s$  op de klimatologische variabelen in functie van het moment in het groeiseizoen. Dit wordt visueel voorgesteld in Figuur 15. Uit deze figuur kan duidelijk worden afgeleid dat de drie deelsets elkaar bijna volledig overlappen. De stomata blijken dus niet wezenlijk anders te reageren op de klimatologische variabelen in de lente, dan in de zomer of de herfst.



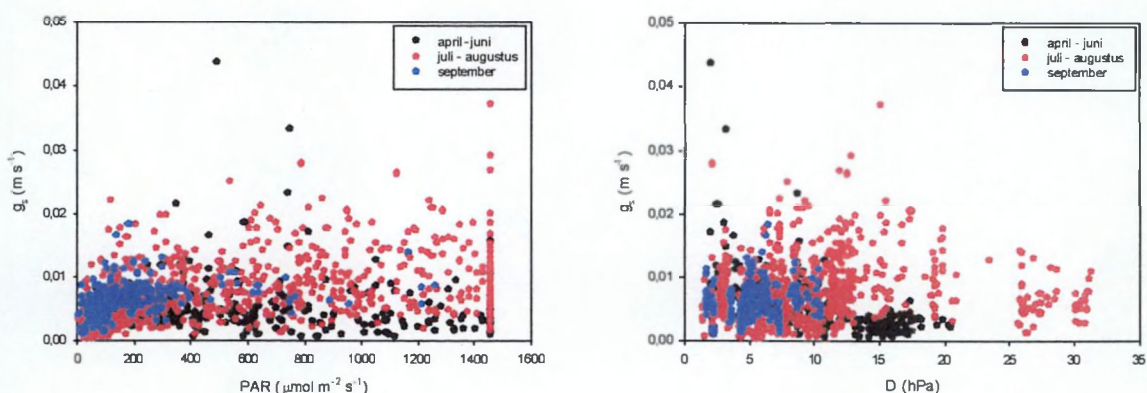
**Figuur 15:** Scatterdiagram met het verband tussen de stomatale geleidbaarheid en (a) PAR en (b) het verzadigingsdeficiet van de lucht opgesplitst in functie van het moment in het groeiseizoen voor de kruiden

Toch werd het model, dat in het voorafgaand onderzoek als beste naar voor gekomen was, aan de drie deelsets via niet-lineaire regressie gefit. Dit model was de vergelijking 3.1. Aangezien in het onderzoek van Samson (2001) dit model ook de beste correlaties opbracht, werd volgend onderzoek voor de kruiddataset enkel nog aan de hand van dit model gevoerd. Als maximale  $g_s$  waarde werd telkens de maximale opgemeten stomatale geleidbaarheid van de betreffende periode genomen. Voor de periode april-juni is dit  $0,0237 \text{ m s}^{-1}$ , juli-augustus  $0,0655 \text{ m s}^{-1}$  en september  $0,0266 \text{ m s}^{-1}$ . Dit model levert een iets lagere  $r^2$  waarde op voor de deelset april-juni en juli-augustus, respectievelijk 0,06 en 0,07. Voor de deelset september werd een iets hogere  $r^2$  bekomen, namelijk 0,10. Er moet echter wel worden opgemerkt dat deze  $r^2$  waarde nog steeds zeer laag is.



Analoog als voor de kruiden het geval was, deden de scatterdiagrammen voor de struiken (Figuur 14) vermoeden dat het niet evident zou zijn om een model te fitten aan deze dataset. Geen enkel model bleek dan ook een hoge  $r^2$  waarde op te leveren. De maximale  $r^2$  waarde die hierbij werd gevonden bedraagt 0,14. Het incorporeren van een temperatuursfunctie in het stomataal weerstandsmodel leverde slechts een kleine positieve bijdrage (maximale  $r^2 = 0,18$ ). Zoals bij de kruiden het geval was, kon ook hier weer de keuze van  $g_{s,max}$  als maximaal opgemeten waarde betwist worden. Deze waarde kan immers eventueel als een *outlier* ten opzichte van de dataset worden beschouwd. Daarom werden dezelfde modellen getest met een andere  $g_{s,max}$ . Deze werd geschat aan de hand van het scatterdiagram (Figuur 14). Als  $g_{s,max}$  werd de waarde 0,0370 genomen. Deze aanpassing leverde geen betere modellen op. De maximale  $r^2$  waarde voor de modellen zonder temperatuursfuncties bedraagt 0,14, met temperatuursfuncties 0,17.

De verklaring voor het feit dat ook aan deze dataset geen modellen kunnen worden gefit, moet gezocht worden in de te grote spreiding van de stomatale geleidbaarheid in functie van de klimatologische variabelen. Een hypothese die hierbij opnieuw gemaakt werd is dat het stomataal apparaat misschien anders reageert in functie van het moment in het groeiseizoen. Net zoals bij de kruiden gebeurd was, werd daarom de volledige dataset opgesplitst in drie deelsets: porometermetingen van (i) april tot en met juni (lenteperiode), (ii) juli en augustus (zomerperiode) en (iii) september (herfstperiode). Evenals bij de kruiddatasets het geval was, kon aan de hand van de scatterdiagrammen voor de verschillende tijdsperiodes gezien worden dat niet alle spreiding op de porometermetingen kan worden verklaard door een verschillende reactie van de stomata op de klimatologische variabelen in functie van de periode in het groeiseizoen. Dit wordt weergegeven in Figuur 16.



Figuur 16: Scatterdiagram met het verband tussen de stomatale geleidbaarheid en (a) PAR en (b) het verzadigingsdeficiet van de lucht opgesplitst in functie van het moment in het groeiseizoen voor de struiken



Uit Figuur 16 kan worden afgeleid dat in de maand september lagere stralingsintensiteiten en verzadigingsdeficiëten van de lucht werden opgemeten. De stomata reageren op deze lage waarden echter niet wezenlijk anders dan in de periode april-juni en juli-augustus. Wat betreft het verzadigingsdeficiet van de lucht kan bij de voorjaarsmetingen wel een duidelijke daling worden waargenomen van  $g$ , bij een stijgend verzadigingsdeficiet van de lucht.

Het model dat in het voorafgaand onderzoek als beste naar voor was gekomen (het model met de temperatuursfunctie niet in acht genomen), werd via niet-lineaire regressie aan de drie deelsets gefit. Dit model was de vergelijking 3.9. Dit was ook het model dat bij Samson (2001) de beste correlaties gaf. Als maximale  $g$  waarde werd telkens de maximaal opgemeten stomatale geleidbaarheid van de betreffende periode genomen. Voor de periode april-juni is dat  $0,0435 \text{ m s}^{-1}$ , juli-augustus  $0,0370 \text{ m s}^{-1}$  en september  $0,0182 \text{ m s}^{-1}$ . Dit model levert een lagere  $r^2$  waarde op voor de deelset april-juni, namelijk 0,04. Voor de deelsets juli-augustus en september werd een hogere  $r^2$  waarde gevonden, respectievelijk 0,23 en 0,24. Ook hier weer kan worden opgemerkt dat deze  $r^2$  waarden nog steeds laag zijn.

Tot hiertoe werden de resultaten besproken van de stomatale modellering van enerzijds alle kruiddata samen en anderzijds alle struikdata samen. Er werd eveneens nagegaan of er modellen konden worden gefit aan de porometermetingen van de afzonderlijke soorten. Net zoals bij de kruid- en struikdatasets werden eerst de modellen uit paragraaf 3.3.2. getest, die enkel een verband leggen tussen PAR en verzadigingsdeficiet van de lucht enerzijds en de stomatale geleidbaarheid anderzijds. In een tweede fase werden eveneens temperatuursfuncties geïncorporeerd en deelmodellen opgesteld naargelang het moment in het groeiseizoen. Voor deze modellen bleek de  $r^2$  waarde eveneens laag in vergelijking met de literatuurwaarden. Daarom werd verder gewerkt met de modellen, bekomen aan de hand van de totale datasets voor de kruiden en de struiken, en de modellen, bekomen aan de hand van de opsplitsing naargelang het moment in het groeiseizoen. Dit zijn dan ook de modellen die in een volgende fase van het onderzoek gevalideerd werden.

#### 4.1.2.2. Validering

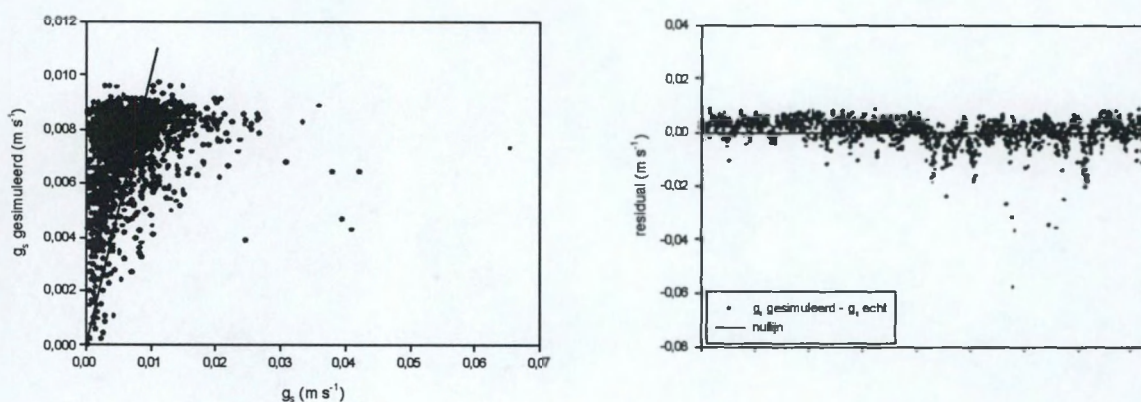
Gezien het grote aantal modellen dat onderzocht werd, was het onmogelijk om alle modellen te valideren met de onafhankelijke validatieset. Bovendien waren bij sommige modellen de  $r^2$  waarden zo laag dat het niet interessant leek een dergelijk model te valideren. Daarom werd telkens slechts het beste model gevalideerd. Hierna wordt eerst dieper ingegaan op de validatie van de modellen door de gesimuleerde waarden voor de stomatale geleidbaarheid te vergelijken met de werkelijk opgemeten waarden. Daarna worden enkele tijdsverlopen van gesimuleerde waarden vergeleken met werkelijk opgemeten waarden. In een derde luik van de validering wordt gebruik gemaakt van enkele statistieken. Dit zal telkens eerst gebeuren voor de kruiddataset en vervolgens voor de struikdataset.



*Verband tussen gesimuleerde en gemeten  $g_s$* 

Eerst zullen de gevonden verbanden tussen gesimuleerde en gemeten  $g_s$  voor de kruiddataset behandeld worden. Vervolgens zal gekeken worden naar deze verbanden voor de struikdataset.

Voor de totale kruiddataset werd het model met de hoogste  $r^2$  waarde weerhouden om te valideren. Dit is het model met vergelijking 3.1. De gesimuleerde stomatale geleidbaarheid voor een onafhankelijke dataset ( $n = 1677$ ) kan worden vergeleken met de werkelijke waarde. Dit wordt weergegeven in het linker deel van Figuur 17. De weergegeven rechte, dit is de 1:1-lijn, duidt op de ideale ligging van de punten. Bij een ideaal model zijn de gesimuleerde stomatale geleidbaarheidswaarden gelijk aan de werkelijk opgemeten waarden. De gesimuleerde waarden blijken echter niet eenduidig op deze rechte te liggen. De gemiddelde waarde van de gesimuleerde  $g_s$  is echter wel vergelijkbaar met de gemiddelde gemeten  $g_s$ . Respectievelijk zijn deze gelijk aan  $0,0072 \text{ m s}^{-1}$  en  $0,0071 \text{ m s}^{-1}$ . De spreiding op de gesimuleerde  $g_s$  is veel kleiner dan op de gemeten waarden. De standaardafwijking op het gemiddelde is immers respectievelijk  $0,0016 \text{ m s}^{-1}$  en  $0,0052 \text{ m s}^{-1}$  voor de gesimuleerde en de gemeten  $g_s$ . In het rechter deel van Figuur 17 worden de residuals weergegeven. Dit is het verschil tussen de gesimuleerde en de gemeten  $g_s$  waarden. Ter verduidelijking wordt hier eveneens de nullijn aangeduid. In het ideale geval liggen alle waarden op deze lijn. Van de 1677 berekende residuals zijn er 664 waarden negatief, de overige 1013 residuals zijn positief. Dit betekent dat 61 % van de gesimuleerde  $g_s$  waarden een te hoge waarde heeft in vergelijking met de werkelijk opgemeten waarde. Het gevonden stomatale weerstandsmodel heeft dus de neiging om de stomatale geleidbaarheid te overschatten.



**Figuur 17:** Vergelijking van de gesimuleerde stomatale geleidbaarheid met de werkelijke stomatale geleidbaarheid voor de kruiden



Een analoge analyse kan worden uitgevoerd voor de modellen, die werden bekomen door de totale dataset op te splitsen in drie deelsets naargelang het tijdstip van opmeten. De gesimuleerde stomatale geleidbaarheid kan dan telkens voor de verschillende onafhankelijke datasets worden vergeleken met de werkelijke waarde. Dit wordt weergegeven in Figuur 18, Figuur 19 en Figuur 20 voor respectievelijk de periode april-juni, juli-augustus en september. De grootte van de validatiesets voor de lente-, de zomer- en de herfstperiode is respectievelijk 313, 1069 en 295 waarnemingen. In geen enkele periode komen de gesimuleerde waarden vrij goed overeen met de opgemeten waarden. De gemiddelde gesimuleerde  $g$  is echter voor de drie perioden wel vergelijkbaar met de gemiddelde opgemeten  $g_s$ . In Tabel 10 wordt de gemiddelde gesimuleerde  $g$  per periode vergeleken met de gemiddelde opgemeten waarde. Hierbij valt op dat de spreiding op de gesimuleerde  $g$  waarden telkens kleiner is dan deze op de gemeten  $g$  waarden. Uit deze tabel blijkt ook nog dat zowel de gemiddelde gemeten als gesimuleerde  $g$  voor de zomerperiode lager is dan in de lente en de herfst. Een mogelijke oorzaak is dat de stomatale geleidbaarheid in de zomerperiode gereduceerd werd door klimatologische omstandigheden. Een lagere  $g$  zou er ook kunnen op wijzen dat tijdens de zomerperiode een (tijdelijk) bodemwatertekort is opgetreden, waardoor de kruiden als reactie de stomata meer gesloten hebben. Deze hypothese kan worden nagegaan door de gemeten  $g$  waarden te relateren aan de diepte van de grondwatertafel. Aan de hand van de kennis van de bewortelingsdiepte kan immers afgeleid worden of er eventueel een bodemwatertekort is opgetreden. Hiervoor wordt verwezen naar de studie van de bewortelingsdiepte (zie 4.3.) en de studie van de grondwatertafeldynamiek (zie 4.4.).

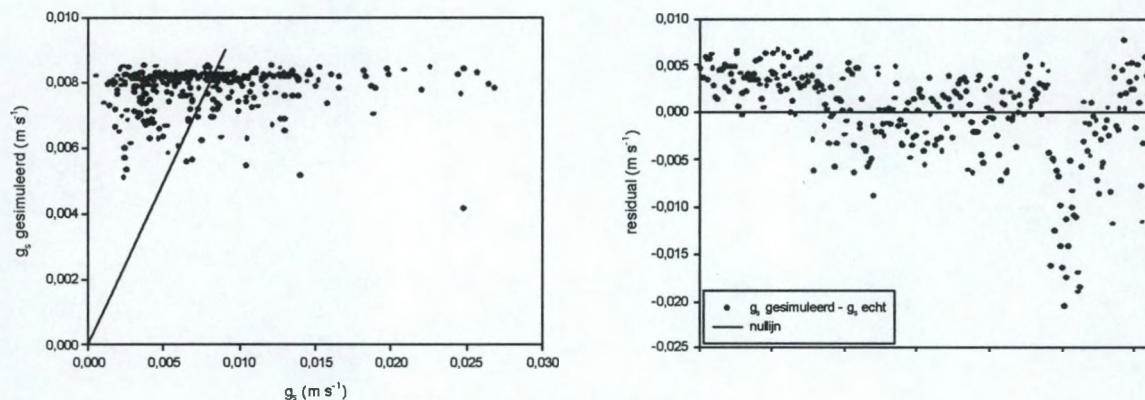
Tabel 10: Vergelijking tussen gemiddelde gesimuleerde en gemeten stomatale geleidbaarheid voor de kruiden in de verschillende deelsets

Periode	Gem $g_s$ , gesimuleerd ( $\text{m s}^{-1}$ )	Gem $g_s$ , gemeten ( $\text{m s}^{-1}$ )
April-juni	$0,0077 \pm 0,0007$	$0,0078 \pm 0,0050$
Juli-augustus	$0,0063 \pm 0,0017$	$0,0067 \pm 0,0053$
September	$0,0076 \pm 0,0018$	$0,0079 \pm 0,0047$

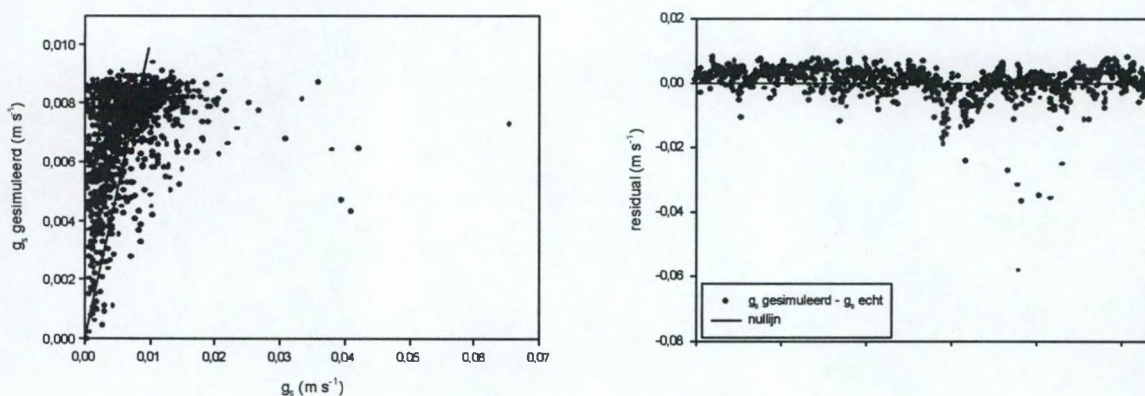
In het rechter deel van Figuur 18, Figuur 19 en Figuur 20 worden de residuals voorgesteld voor de verschillende tijdsperiodes. Dit is telkens het verschil tussen de gesimuleerde  $g$  en de werkelijk opgemeten waarde. Voor de periode april-juni vallen er 188 van de 313 berekende residuals boven de nullijn. Dat wil zeggen dat er 60 % van de gesimuleerde  $g$  waarden een te hoge waarde heeft in vergelijking met de werkelijk opgemeten waarde. Voor de periode juli-augustus vallen er 657 van de 1069 residuals boven de nullijn. Van de gesimuleerde  $g_s$  waarden blijkt er dus 61 % een te hoge schatting op te leveren in vergelijking met de



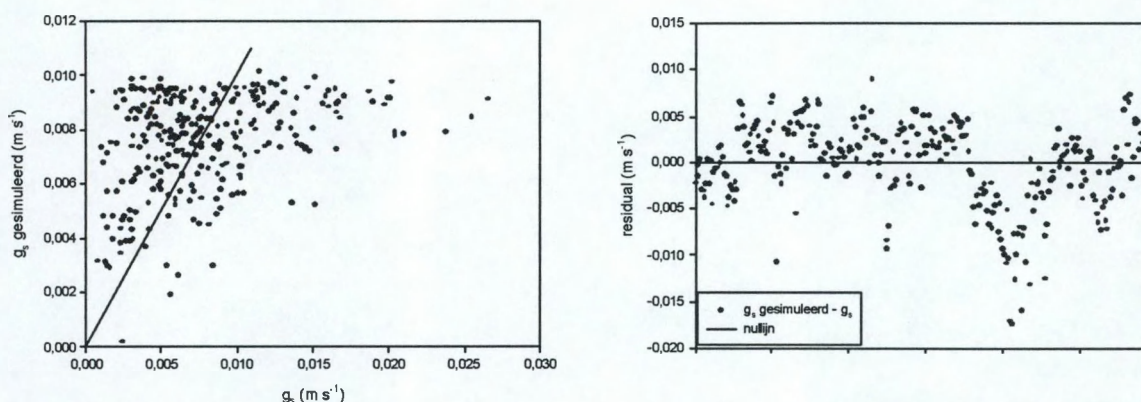
werkelijk gemeten waarde. Van de residuals in de dataset van september blijkt dat 164 van de 295 waarden zich boven de nullijn bevinden. Dit komt overeen met een overschatting van de stomatale geleidbaarheid in 56 % van de gevallen.



Figuur 18: Vergelijking van de gesimuleerde stomatale geleidbaarheid met de werkelijke stomatale geleidbaarheid voor de kruiden in de periode april-juni

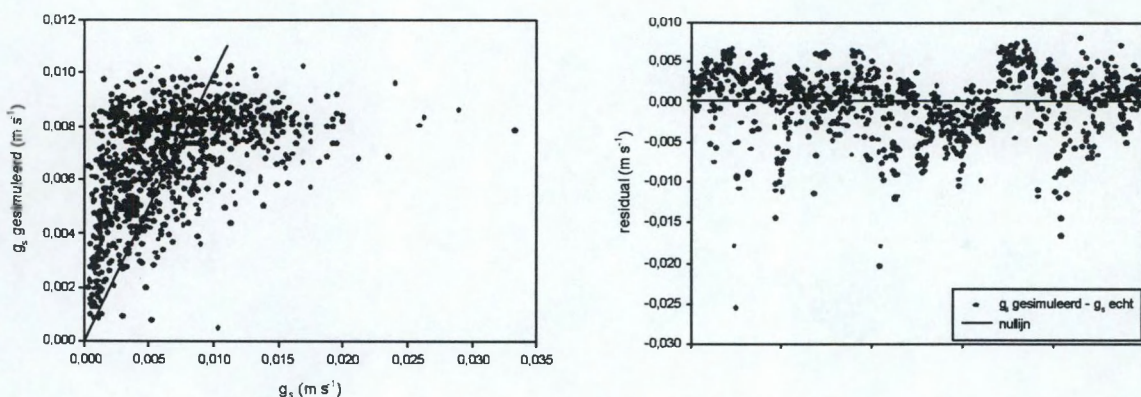


Figuur 19: Vergelijking van de gesimuleerde stomatale geleidbaarheid met de werkelijke stomatale geleidbaarheid voor de kruiden in de periode juli-augustus



**Figuur 20: Vergelijking van de gesimuleerde stomatale geleidbaarheid met de werkelijke stomatale geleidbaarheid voor de kruiden in de periode september**

Net zoals voor de totale kruiddataset, werd voor de totale struikdataset enkel het model dat de hoogste  $r^2$  waarde opleverde met een onafhankelijke dataset ( $n=1002$ ) gevalideerd. Het weerhouden model is eveneens het model 3.1. In Figuur 21 worden de gesimuleerde  $g_s$  waarden vergeleken met de werkelijk opgemeten waarden. De waarden blijken niet op de eerste bissectrice te vallen. De gemiddelde gesimuleerde  $g_s$  is wel vergelijkbaar met de gemiddelde opgemeten  $g_s$ . Deze zijn respectievelijk  $0,0068 \text{ m s}^{-1}$  en  $0,0070 \text{ m s}^{-1}$ . De spreiding op de gesimuleerde  $g$  is echter kleiner dan op de werkelijk opgemeten  $g$  waarden. In het rechter deel van Figuur 21 worden de residuals weergegeven. Van de 1002 berekende residuals zijn er 563 waarden positief. Dit betekent dat 56 % van de gesimuleerde  $g$  waarden een overschatting zijn van de werkelijke waarde.



**Figuur 21: Vergelijking van de gesimuleerde stomatale geleidbaarheid met de werkelijke stomatale geleidbaarheid voor de struiken**

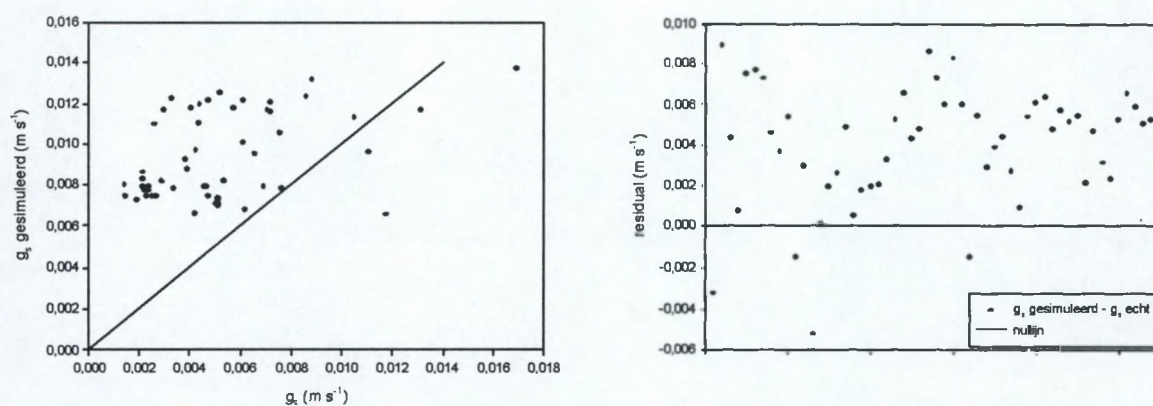


Een analoge analyse wordt uitgevoerd voor de modellen die werden bekomen door de totale dataset op te splitsen in drie deelsets naargelang het tijdstip waarop de metingen plaatsvonden in het seizoen. De grootte van de validatiesets voor de lente-, de zomer- en de herfstperiode is respectievelijk 54, 787 en 161 waarnemingen. Voor de verschillende onafhankelijke datasets kan telkens de gesimuleerde  $g_s$  vergeleken worden met de opgemeten  $g_s$ . Dit wordt weergegeven in Figuur 22, Figuur 23 en Figuur 24 voor respectievelijk de periode april-juni, juli-augustus en september. In geen enkele periode blijken de gesimuleerde  $g$  waarden vrij goed samen te vallen met de werkelijk opgemeten waarden. In Tabel 11 worden de gemiddelde gesimuleerde  $g_s$  en de gemiddelde gemeten  $g_s$  voor de verschillende perioden gegeven. Voor de periodes juli-augustus en september liggen de gemiddelde gesimuleerde en de gemiddelde opgemeten  $g$  dicht bij elkaar. Dit is niet het geval voor de periode april-juni. In deze periode wordt met het model gemiddeld een hogere  $g_s$  gegenereerd dan in werkelijkheid het geval is. Misschien is dit te wijten aan het feit dat het model voor de lenteperiode slechts op een gering aantal waarnemingen (54) gebaseerd is. De spreiding op de gesimuleerde waarden is steeds kleiner dan op de gemeten  $g_s$ .

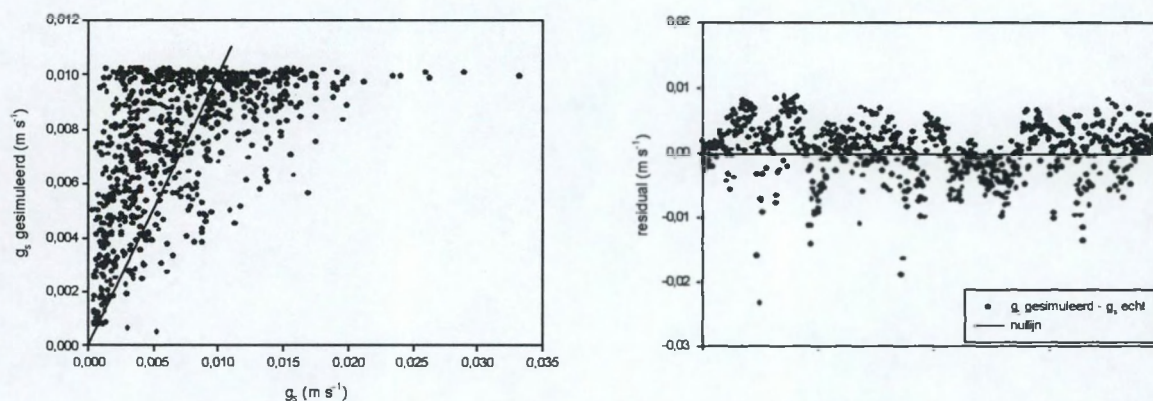
Tabel 11: Vergelijking tussen gemiddelde gesimuleerde en gemeten stomatale geleidbaarheid voor de struiken in de verschillende deelsets

Periode	Gem $g_{s, \text{gesimuleerd}}$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	Gem $g_{s, \text{gemeten}}$ ( $\text{m s}^{-1}$ )
April-juni	$0,0093 \pm 0,0021$	$0,0053 \pm 0,0031$
Juli-augustus	$0,0074 \pm 0,0025$	$0,0071 \pm 0,0050$
September	$0,0066 \pm 0,0014$	$0,0070 \pm 0,0031$

In het rechter deel van Figuur 22, Figuur 23 en Figuur 24 worden de residuals voorgesteld voor de verschillende tijdsperiodes. Voor de periode van april tot juni vallen er 50 van de 54 berekende residuals boven de nullijn. Dit betekent dat 93 % van de gesimuleerde  $g$  waarden een overschatting zijn ten opzichte van de werkelijk opgemeten waarden. Voor de periode juli-augustus zijn er 478 van de 787 residuals positief. Van de gesimuleerde  $g$  waarden blijkt dus dat er 61 % een te hoge schatting opleveren ten opzichte van de werkelijk opgemeten waarde. In de dataset van september blijkt dat 75 van de 161 residuals boven de nullijn liggen. Dit betekent dat 47 % van de gesimuleerde  $g_s$  waarden een overschatting zijn van de werkelijke waarde.

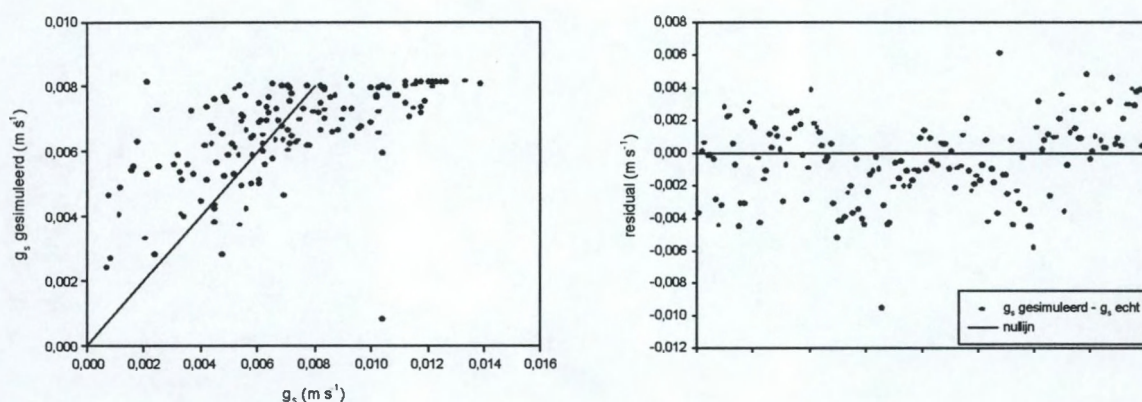


Figuur 22: Vergelijking van de gesimuleerde stomatale geleidbaarheid met de werkelijke stomatale geleidbaarheid voor de struiken in de periode april-juni



Figuur 23: Vergelijking van de gesimuleerde stomatale geleidbaarheid met de werkelijke stomatale geleidbaarheid voor de struiken in de periode juli-augustus



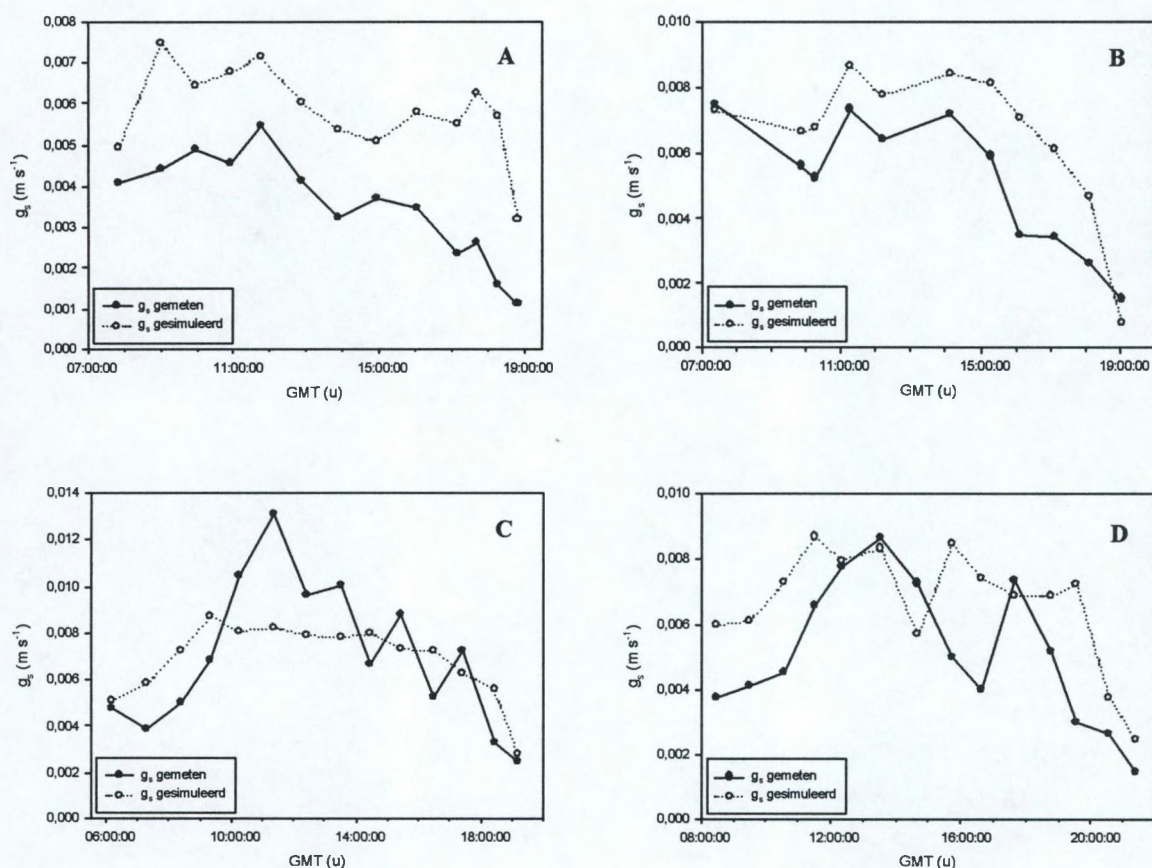


Figuur 24: Vergelijking van de gesimuleerde stomatale geleidbaarheid met de werkelijke stomatale geleidbaarheid voor de struiken in de periode september

#### *Tijdsverlopen van gesimuleerde en gemeten $g_s$*

Hierna worden enkele tijdsverlopen van gemeten en gesimuleerde stomatale geleidbaarheden met elkaar vergeleken. Hiervoor werden een aantal meetdagen en plantensoorten willekeurig uit de validatieset gekozen.

In Figuur 25 worden enkele dagverlopen van de gesimuleerde  $g_s$  vergeleken met de opgemeten  $g$  voor de resultaten gebaseerd op het model dat werd afgeleid voor de totale kruiddataset.

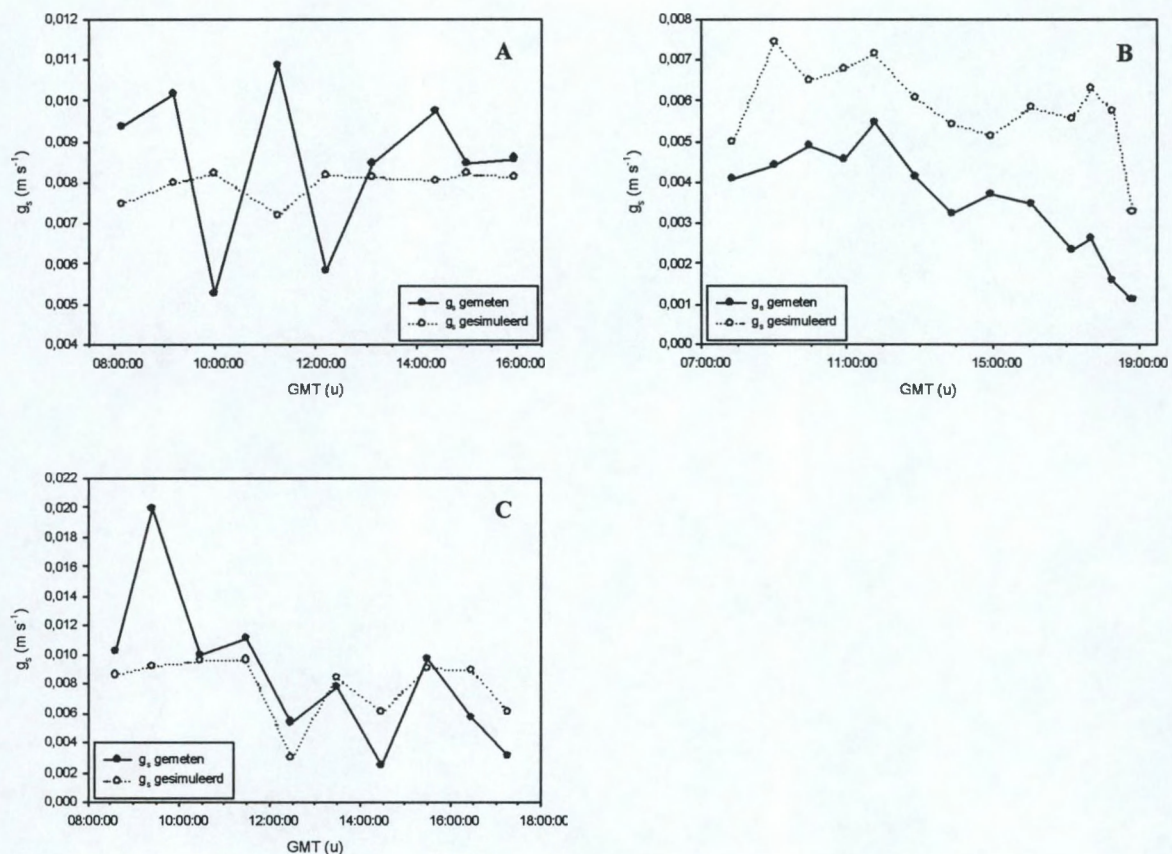


**Figuur 25:** Tijdsverloop van gesimuleerde en gemeten  $g_s$  voor enkele meetdagen voor het model gebaseerd op de totale kruiddataset. Met (A) waarden voor Dauwbraam op 15/07/02, (B) waarden voor Dauwbraam 27/07/02 en (C) waarden voor Grote kattestaart op 26/07/02 en (D) waarden voor watermunt op 26/07/02

Uit Figuur 25 blijkt dat de gesimuleerde  $g_s$  waarden een duidelijk dagverloop vertonen. Uit dezelfde figuur blijkt ook dat de het verloop van de gesimuleerde  $g_s$  dikwijls goed overeenstemt met deze van de werkelijk opgemeten  $g_s$ . zoals blijkt uit Figuur 25a en b is er soms een systematische overschatting van het model. In andere gevallen (Figuur 25c en d) is er voornamelijk een overschatting van het model in de ochtend- en de avondperiode.

In Figuur 26 worden enkele dagverlopen weergegeven voor de resultaten van de verschillende modellen resulterende uit de opsplitsing van de totale kruiddataset in drie deelsets naargelang het moment in het groeiseizoen.

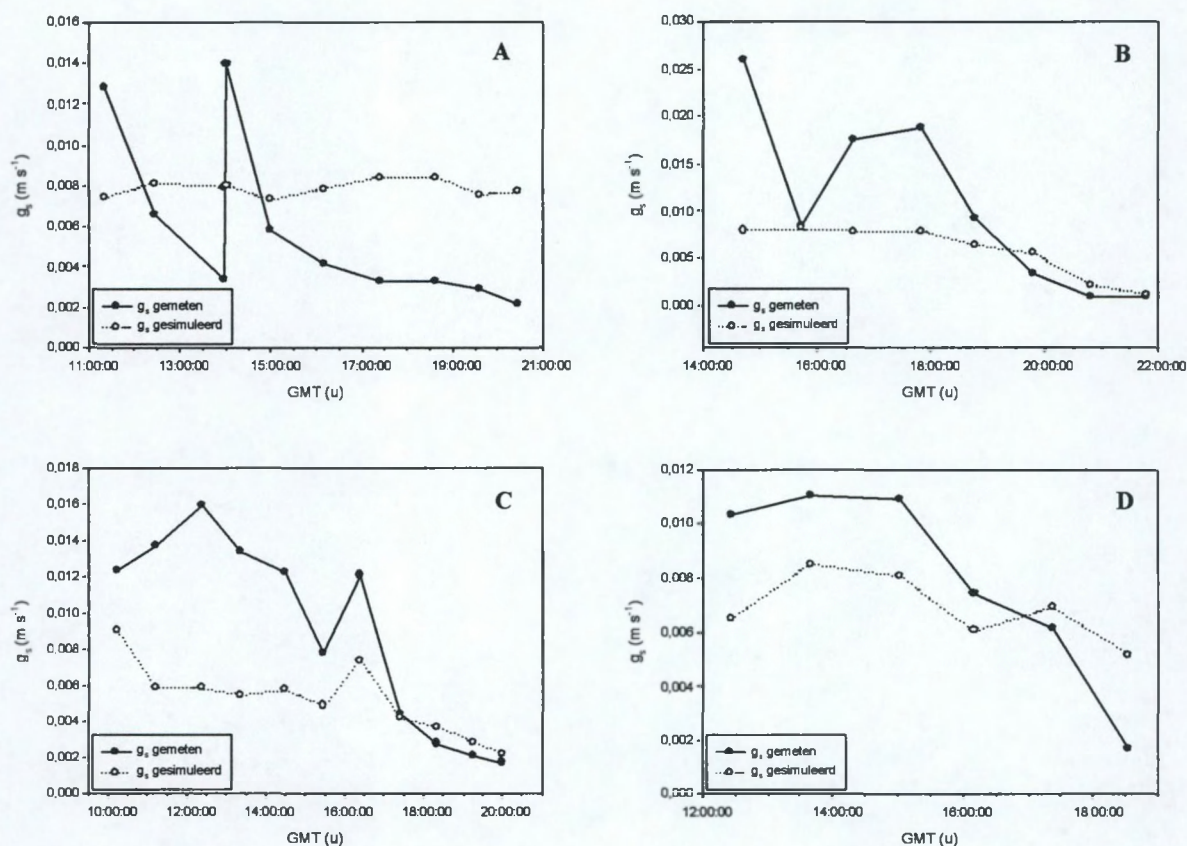




Figuur 26: Tijdsverloop van gesimuleerde en gemeten  $g$  voor enkele meetdagen voor de modellen opgesteld op basis van de drie deelsets van de totale kruiddataset. Met (A) waarden voor Grote kattestaart op 24/06/02, (B) waarden voor Dauwbraam op 15/07/02 en (C) waarden voor Duinriet op 5/09/02

Uit Figuur 26a komt naar voor dat het model voor de periode april-juni de extreme opgemeten waarden niet genereert, maar eerder een gemiddelde  $g$  simuleert. In Figuur 26b en c komen de dagverlopen van de gesimuleerde en de gemeten  $g$  wel vrij goed met elkaar overeen.

In Figuur 27 worden enkele dagverlopen weergegeven van de gesimuleerde en de gemeten  $g$  voor, waarbij de gesimuleerde  $g$  werd berekend op basis van de totale struikdataset.

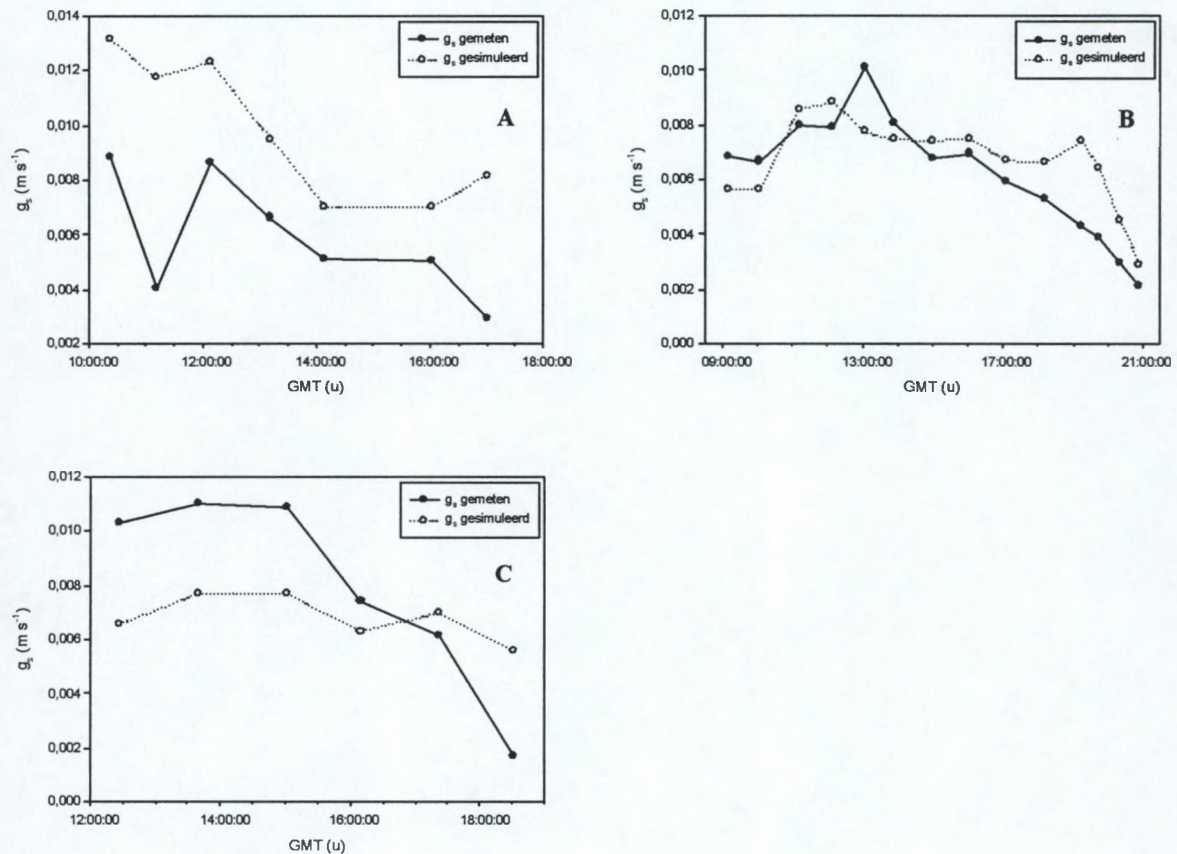


**Figuur 27:** Tijdsverloop van gesimuleerde en gemeten  $g_s$  voor enkele meetdagen voor het model gebaseerd op de totale struikdataset. Met waarden voor Kruidwilt op (A) 19/07/02, (B) 27/07/02, (C) 23/08/02 en (D) 14/09/02

Uit Figuur 27 blijkt dat de gesimuleerde waarden meestal een gemiddelde  $g_s$  weergeven en de dagelijkse variatie en extreme waarden niet worden gegenereerd met het model.

In Figuur 28 worden enkele dagverlopen weergegeven voor de gesimuleerde en de gemeten  $g_s$  voor de struiken, waarbij de gesimuleerde  $g_s$  waarde werd verkregen uit een afzonderlijk stomataal weerstandsmodel voor de verschillende deelperiodes van het groeiseizoen.





**Figuur 28:** Tijdsverloop van gesimuleerde en gemeten  $g$  voor enkele meetdagen voor de modellen opgesteld op basis van de drie deelsets van de totale struikdataset. Met A gemeten op 25/04/02, B op 15/07/02 en C op 14/09/02.

Figuur 28a duidt op een systematische overschatting van het model ten opzichte van de werkelijk opgemeten  $g$  waarden. In Figuur 28b blijkt dat de diurnale dynamiek vrij goed wordt ingeschat. Het weergegeven dagverloop voor een meetdag in september (Figuur 28c) blijkt dan weer dat er eerder een gemiddelde  $g$  waarde wordt gegenereerd door het model.

Tot nu toe werd de evaluatie van de modellering enkel visueel uitgevoerd. De validering van de modellering kan ook gebeuren aan de hand van enkele statistieken. Dit wordt hierna uitgevoerd.

*Statistische evaluatie van de stomatale weerstandsmodellen*

In Tabel 12 worden de resultaten gegeven van de statistische analyse (zie 3.3.2.3.) van de verschillende geteste stomatale weerstandsmodellen.

**Tabel 12: Statistische evaluatie van de verschillende stomatale weerstandsmodellen voor de kruiden en de struiken. Met RMSE = *Root mean squared error*, ME = *model efficiëntie*, CD = *determinatie coëfficiënt***

Model	RMSE (-)	ME (-)	CD (-)
Kruiden	0,005	0,098	9,258
Kruiden april-juni	0,005	0,011	52,142
Kruiden juli-augustus	0,005	0,092	9,229
Kruiden september	0,004	0,100	6,638
Struiken	0,004	0,218	5,607
Struiken april-juni	0,005	-1,567	0,465
Struiken juli-augustus	0,004	0,290	3,926
Struiken september	0,003	0,325	30,226

De RMSE kan enkel gebruikt worden indien de veronderstelling opgaat dat de verschillen tussen de gesimuleerde en de gemeten  $g$  waarden normaal verdeeld zijn met een gemiddelde nul en een constante standaardafwijking. Dit is getest voor enkele modellen en bleek niet het geval te zijn. Indien met deze voorwaarde geen rekening wordt gehouden, dan blijkt dat alle waarden dicht bij nul liggen, wat wijst op een model dat de werkelijkheid goed simuleert. De RMSE voor de verschillende geteste modellen varieert bijna niet. De maximale waarschijnlijkheid van de modellen lijkt volgens deze schatter groot te zijn, en voor alle modellen ongeveer gelijk.

Aanvaardbare modelsimulaties hebben een ME tussen nul en één. Dit blijkt het geval te zijn voor alle modellen met uitzondering van het model voor de struiken in de periode april-juni. Voor dit laatste model is volgens deze statistiek de gemiddelde gemeten  $g_s$  een betere voorspeller van de stomatale geleidbaarheid dan het model. De verschillen voor de modellen onderling zijn klein.

De CD heeft een optimale waarde van één. Een waarde groter dan één wijst op een modelonderschatting, een waarde tussen nul en één op een modeloverschatting. Uit Tabel 12 blijkt dat de meeste modellen een onderschatting geven van de werkelijk opgemeten  $g_s$  waarden. Het model voor de struiken in de periode april-juni geeft een overschatting van de werkelijke  $g$  waarden. Dit is echter in tegenstelling met de conclusies die konden worden getrokken uit de berekening van de *residuals* voor de verschillende modellen. Hiebij bleek immers dat de meeste stomatale weerstandsmodellen de neiging vertonen om een



overschatting te geven van de werkelijke waarde. Volgens Vázquez *et al.* (1999) is de determinatie coëfficiënt CD echter zeer gevoelig voor fouten en dus minder betrouwbaar.

*Uit de voorgaande evaluatie van de stomatale weerstandsmodellen voor de kruiden en de struiken kunnen volgende zaken worden besloten. Aangezien het opstellen van een stomataal weerstandsmodel per onderzochte plantensoort geen grote verbeteringen opleverde wat betreft de  $r^2$  waarde, werden deze modellen niet weerhouden.*

*Het opsplitsen van de totale kruid- en struikdataset in tijdsperiodes (lente, zomer en herfst) levert geen wezenlijke verbeteringen op. Toch zal deze opsplitsing voor de verschillende tijdsperiodes gebruikt worden in het FORUG model om de evapotranspiratie te simuleren, aangezien de veronderstelling van een seizoenale weerstandsdynamiek kan worden gemaakt.*

*Uiteindelijk werd één model weerhouden voor zowel de kruiddataset en de struikdataset in de verschillende tijdsperiodes. Dit ene model laat toe de berekende evapotranspiratiewaarden uit het FORUG-model van de verschillende vegetaties met elkaar te vergelijken.*

*Het uiteindelijk weerhouden model is het volgende:*

$$g_s = g_{s,max} \cdot \frac{PAR}{(PAR + a)} \cdot [b - c \ln(D)] \quad (3.9)$$

Met  $g_s$  = de stomatale geleidbaarheid ( $m s^{-1}$ );  
 $g_{s,max}$  = de maximale stomatale geleidbaarheid ( $m s^{-1}$ );  
 $PAR$  = de fotosynthetisch actieve straling ( $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ );  
 $D$  = het verzadigingsdeficiet van de lucht (hPa) en  
 $a, b, c, d$  = parameters.

*De parameters werden via niet-lineaire regressie bepaald en worden voor de verschillende deelmodellen van enerzijds de kruiddataset en anderzijds de struikdataset samengevat in Tabel 13.*

*Tabel 13: Weergave van de maximale stomatale geleidbaarheid ( $g_{s,max}$ ) en de parameters (a,b,c) van de verschillende weerhouden deelmodellen voor de kruiden en de struiken*

Dataset	$G_{s,max}$	a	b	c
Kruiden april-juni	0,0237	58	0,2942	-0,0254
Kruiden juli-augustus	0,0655	62	0,1600	0,0103
Kruiden september	0,0266	99	0,4274	0,0171
Struiken april-juni	0,0435	77	0,4496	0,1376
Struiken juli-augustus	0,0370	121	0,2823	-0,0047
Struiken september	0,0182	41	0,4858	0,0128

*Uit deze tabel blijkt dat de maximale stomatale geleidbaarheid  $g_{s,max}$  voor de kruiden en de struiken dicht bij elkaar liggen.*

*De totale  $r^2$  waarde van de geselecteerde modellen is niet groot (maximum 0,24) wegens een grote spreiding op de opgemeten  $g_s$  waarden. Deze  $r^2$  waarde is voor de modellen op basis van de struikdataset slechts weinig hoger dan voor de modellen op basis van de kruiddataset.*



#### 4.1.3. LAI metingen

##### 4.1.3.1. Destructieve LAI-bepaling

###### *Destructieve LAI-bepaling*

In Tabel 14 en Tabel 15 worden de resultaten van de destructieve LAI-bepalingen getoond voor respectievelijk de bemonsterde kruid-en struikvegetaties. In eerste instantie wordt hierbij een gedetailleerde beschrijving gegeven van de LAI per soort. Daarnaast wordt ook telkens de totale LAI-waarde van het bemonsterde plot weergegeven. In Tabel 14 zijn de waarden tussen haakjes de som van de LAI van alle hogere planten zonder rekening te houden met de mossen. Bij het bepalen van de totale LAI van de verschillende proefvlakken zal immers geen rekening gehouden worden met de mosbedekking (zie 3.3.3.2.).

Tabel 14: Resultaten van de destructieve LAI-bepalingen voor de kruidvegetaties

Vegetatietype	Plantensoort	LAI	Totale LAI
Pionierspanne	Kruipwilg	0,62	0,85
	Drienvrige zegge	0,01	
	Zomprus	0,03	
Ontstruweelde panne	restfractie	0,19	2,30 (1,72)
	Grote kattestaart	0,69	
	Wolfspoot	0,31	
	Watermunt	0,19	
	Schietwilg	0,05	
	Grassen en schijngrassen	0,04	
	Koninginnekruid	0,01	
	restfractie	0,43	
	mos	0,58	
	Gewone waternavel	0,32	
	Grote kattestaart	0,18	
Ontstruweelde panne	Watermunt	0,11	2,40 (0,93)
	Wolfspoot	0,08	
	Dauwbraam	0,06	
	Restfractie	0,18	
	mos	1,47	
	Kruipwilg	0,64	
	Zeggesoorten	0,39	
	Zomprus	0,08	
Jonge panne	Gewone waternavel	0,06	2,85 (1,38)
	Duinriet	0,03	
	restfractie	0,18	
	mos	1,47	
	Duindoorn	1,00	
	Duinriet (dood)	0,78	
	Kruipwilg	0,29	
Jonge panne met lage Duindoorn	Distel soort	0,01	2,08
	Gestreepte witbol	2,28	
	Gestreepte witbol	2,80	
Homogene Gestreepte Witbol *	Gestreepte witbol	2,80	2,80
Homogene Gestreepte Witbol *	Gestreepte witbol	2,80	2,80
Homogene Riet °	Riet	6,21	6,21
Homogene Riet °	Riet	6,11	6,11

\* Aangezien Gestreepte witbol in geen enkele destructieve bepaling was opgemeten, werd de LAI van een homogene zone Gestreepte witbol afzonderlijk destructief bepaald.

° Een proefvlak bestaat uit een bijna homogene rietvegetatie. Daarom werd de LAI opgemeten van een homogene zone met Riet.



Uit Tabel 14 blijkt dat indien er in de kruidachtige vegetaties mossen aanwezig zijn deze een groot deel van de LAI uitmaken ( $LAI = 0,58$  tot  $1,47$ ). Hierbij kan echter wel opgemerkt worden dat het bepalen van de LAI van mossen niet evident is. Het is immers zo dat het soms moeilijk is om een onderscheid te maken tussen blaadjes en wortels. Daarenboven is uit vroeger onderzoek gebleken dat naargelang de vochtigheidsgraad van de mossen de LAI sterk kan variëren. De opgemeten LAI-waarden voor de mossen moeten dan ook kritisch worden benaderd.

De LAI van de homogene rietvegetaties liggen duidelijk veel hoger dan die van de andere kruidvegetaties.

Verder blijkt uit Tabel 14 dat er op de destructief bepaalde LAI-waarden een zekere variatie te vinden is. Het was echter niet mogelijk om volledig identieke herhalingen te doen. Daarenboven is het zo dat er bij de LAI-berekeningen van de proefvlakken gebruik zal worden gemaakt van de destructieve bemonsteringen waarvan de vegetatie het best overeenstemt met de vegetatie in de proefvlakken.

Indien uit de resultaten weergegeven in Tabel 14 gemiddelde LAI-waarden worden berekend voor een gemiddelde vegetatie in een ontstruweelde panne, een jonge panne en een pionierspanne, dan kan het volgende afgeleid worden. De jonge panne heeft de grootste LAI ( $1,73$ ), gevolgd door de ontstruweelde panne ( $1,32$ ) en de pionierspanne ( $0,85$ ). Bij het berekenen van deze gemiddelde waarde werd geen rekening gehouden met de mosbedekking.

Net zoals gedaan werd voor de kruidvegetatietypen kunnen uit Tabel 15 voor de verschillende struikvegetatietypen gemiddelde LAI-waarden berekend worden. Hieruit blijkt dat het Kruipwilg struweel gemiddeld de grootste LAI heeft ( $5,2$ ). Het Kruipwilg-Duindoorn struweel heeft een LAI van  $4,13$ . Het jong Duindoorn struweel heeft een iets lagere LAI van  $3,29$ . Tenslotte blijkt dat het Liguster struweel een gemiddelde LAI van  $3,06$  heeft.

Tabel 15: Resultaten van de destructieve LAI-bepalingen voor de struikvegetaties

Vegetatietype	Plantensoort	LAI	Totale LAI
Liguster struweel	Wilde liguster	2,76	2,86
	Duinriet	0,10	
Liguster struweel	Wilde liguster	2,88	3,25
	Duindoorn	0,17	
	Dauwbraam	0,17	
	Grote brandnetel	0,02	
	Basterdwederik + restfractie	0,01	
Jong Duindoornstruweel	Duindoorn	1,91	3,29
	Duinriet	0,48	
	Kruipwilg	0,46	
	Dauwbraam	0,44	
Kruipwilg-Duindoorn struweel	Kruipwilg	2,28	4,13
	Duindoorn	1,44	
	Duinriet + restfractie	0,41	
Kruipwilg struweel	Kruipwilg	4,15	4,45
	Dauwbraam	0,30	
Kruipwilg struweel	Kruipwilg	4,24	5,92
	Duinriet	1,52	
	Dauwbraam	0,16	

*LAI-bepaling in de 22 proefvlakken op basis van de destructief bepaalde LAI-waarden*

In Tabel 16, Tabel 17 en Tabel 18 worden de resultaten weergegeven van de LAI-berekening voor de verschillende proefvlakken, respectievelijk voor de kruiden, de niet begraasde en gemaaide panne en de struiken.

Tabel 16: Resultaten van de LAI-berekening voor de kruidvegetaties

Proefvlak	Vegetatietype	LAI
3	Pionierspanne	0,53
10a	Pionierspanne	0,30
4	Ontstruweelde panne	0,40
10c	Jonge panne	0,44
2	Jonge panne	0,40
10b	Jonge panne	0,30
11a	Jonge panne met lage Duindoorn	0,47

Uit de LAI-berekeningen voor de kruidachtige vegetaties blijkt dat er, wat deze parameter betreft, geen duidelijk verschil is tussen een ontstruweelde panne, een jonge panne en een pionierspanne.



Tabel 17: Resultaat van de LAI-berekening voor de niet begraasde en gemaaide panne met een dominantie van Riet

Proefvlak	Vegetatietype	LAI
14b	Niet begraasde en gemaaide panne	3,19

Tabel 18: Resultaten van de LAI-berekening voor de struikvegetaties

Proefvlak	Vegetatietype	LAI <sub>struik</sub>	LAI <sub>kruid</sub>	LAI <sub>totaal</sub>
13a	Liguster struweel	2,73	0,00	2,73
6	Liguster struweel	1,28	0,17	1,45
5	Kruipwilg-Duindoorn struweel	2,73	0,06	2,79
8a	Kruipwilg-Duindoorn struweel	1,69	0,23	1,92
8b	Kruipwilg-Duindoorn struweel	1,55	0,09	1,65
9b	Kruipwilg-Duindoorn struweel	1,28	0,08	1,36
12b	Gemengd struweel	2,03	1,00	3,03
12a	Gemengd struweel	1,48	0,63	2,11
9a	Gemengd struweel	1,51	0,07	1,58
1	Gemengd struweel	1,13	1,43	1,56
13b	Gemengd struweel	1,33	0,13	1,46
7	Gemengd struweel	0,09	0,14	0,23
11b	Jong Duindoorn struweel	0,47	0,16	0,63

Uit de LAI-resultaten voor de struikachtige proefvlakken blijkt dat de LAI-waarden voor proefvlak 7 zeer laag zijn. Een mogelijke verklaring is dat een groot deel van de aanwezige struiken dood waren. Op het moment van de keuze van de proefvlakken was dit echter niet opgevallen omdat de struiken nog niet uitgelopen waren.

Het blijkt ook dat er een relatief grote spreiding op de LAI-resultaten is (zie Tabel 18). De belangrijkste reden hiervoor is dat er per vegetatietype zoveel mogelijk representatieve proefvlakken gekozen werden. Zo werd bijvoorbeeld rekening gehouden met verschillende hoogtes van de vegetatie. Binnen één vegetatietype is er dus een zekere natuurlijke variatie te vinden. Hierdoor wordt ook een grote variatie waargenomen in de berekende LAI.

Uiteindelijk is het de bedoeling om de evapotranspiratie van enkele gemiddelde struikachtige vegetatietypes te berekenen. Daarom wordt ook een gemiddelde waarde van de LAI per struikvegetatie berekend. Met deze gemiddelde LAI-waarden zal de evapotranspiratie dan verder berekend worden met behulp van het FORUG model (zie 4.2.). Het resultaat van deze gemiddelde LAI-waarden per kruid- en struikvegetatietype, zoals weergegeven in Tabel 16 en Tabel 18, wordt respectievelijk weergegeven in Tabel 19 en Tabel 20.

Tabel 19: Resultaat van de berekening van een gemiddelde LAI per kruidvegetatietype

Vegetatietype	LAI
Pionierspanne	0,42
Jonge panne	0,40
Ontstruweelde panne	0,40

Tabel 20: Resultaat van de berekening van een gemiddelde LAI per struikvegetatietype

Vegetatietype	LAI <sub>struik</sub>	LAI <sub>kruid</sub>	LAI <sub>totaal</sub>
Liguster struweel	2,01	0,09	2,10
Kruipwilg-Duindoorn struweel	1,81	0,12	1,93
Gemengd struweel	1,26	0,40	1,66
Jong Duindoorn struweel	0,47	0,16	0,63

Uit Tabel 20 kan afgeleid worden dat een Liguster struweel gemiddeld een grotere LAI heeft dan een Kruipwilg-Duindoorn struweel. Een Kruipwilg-Duindoorn struweel blijkt op zich weer een grotere LAI te hebben dan een gemengd struweel. Een gemengd struweel is immers meestal veel ijler dan een Liguster of een Kruipwilg-Duindoorn struweel. Deze rangorde blijkt in tegenspraak te zijn met de rangorde die bekomen werd uit de destructieve LAI-bepaling. Bij deze bepaling bleek immers dat het Liguster struweel de kleinste LAI heeft van de verschillende bemonsterde vegetaties. Het is echter wel zo dat de destructief bemonsterde Liguster struiken gemiddeld een lagere maximale hoogte (150 cm) hadden dan de Liguster struiken in de proefvlakken (200 cm). Door dus rekening te houden met de werkelijke grootte van de vegetatie in elk proefvlak, wordt met de gebruikte methodes een meer realistische waarde bekomen.

Het jong Duindoorn struweel heeft duidelijk een veel lagere LAI dan de andere struikvegetaties. Dat is te wijten aan het feit dat door de hoge neerslag van de laatste jaren de standplaats van deze vegetatie een zeer lange periode van het jaar onder water staat. Duindoorn blijkt niet bestand te zijn tegen dergelijke natte standplaatscondities, waardoor de vitaliteit van deze struik op de nattere plaatsen sterk gedaald is. Zo zijn er reeds heel wat Duindoorn struiken afgestorven.

Indien men de LAI van de struikvegetaties vergelijkt met de LAI van de kruidvegetaties, dan blijkt dat er een duidelijk verschil bestaat. De LAI-waarden van de kruidachtige vegetaties liggen duidelijk lager dan de LAI-waarden van de struikachtige vegetaties. Hierbij moet wel een uitzondering gemaakt worden voor het jong Duindoorn struweel (Tabel 20), waarvan de waarde meer overeenkomt met die van de kruidvegetaties (Tabel 19).



De berekende LAI-waarden voor de proefvlakken kunnen worden vergeleken met de resultaten uit de destructieve bemonsteringen. Het blijkt dan dat deze berekende LAI-waarden voor de proefvlakken lager liggen dan de op destructieve wijze bepaalde LAI-waarden. Wegens de uniforme werkwijze voor zowel struiken- als kruidenproefvlakken kan echter worden gesteld dat, indien de berekende LAI-waarden niet volledig correct zijn, er toch een eenduidige vergelijking kan worden gemaakt tussen de beide vegetatietypes en binnen de types.

Verder blijkt ook nog dat de rangorde van de LAI-waarden van de verschillende vegetatietypen niet dezelfde is als van de destructief bepaalde LAI-waarden (zie Tabel 14, Tabel 15, Tabel 16 en Tabel 18).

De bekomen bladoppervlakte-index kan eveneens worden vergeleken met de optisch bepaalde LAI-meting (zie 4.1.3.2.)

#### 4.1.3.2. Optische LAI-bepaling

Zoals reeds eerder vermeld, werden de optische LAI-metingen uitgevoerd in de destructief bemonsterde plotjes evenals in de 22 proefvlakken.

Eerst zal een vergelijking worden gemaakt tussen de destructief bepaalde LAI en de optisch bepaalde LAI. Daarna worden de berekende LAI-waarden voor de 22 proefvlakken vergeleken met de optisch bepaalde LAI.

#### *Optische versus destructieve LAI-bepaling*

In de destructief bemonsterde plots werd eveneens een optische LAI-bepaling uitgevoerd. Dit gebeurde echter niet voor alle destructief bemonsterde plots, daar op het moment van de optische LAI-metingen nog niet alle destructief te bemonsteren plots waren vastgelegd. Tabel 21 en Tabel 22 geven telkens de destructieve en de optische LAI-waarden weer voor respectievelijk enkele kruid- en struikvegetaties. Voor de beide ontstruweelde pannen zijn de waarden tussen haakjes in Tabel 21 de LAI van het bemonsterde plot zonder rekening te houden met de mosbedekking.

Tabel 21: Vergelijking tussen de destructieve en de optische LAI-bepaling voor kruidvegetaties

Vegetatietype	Destructieve LAI-bepaling	Optische LAI-bepaling
Ontstruweelde panne	2,30 (1,72)	1,8
Ontstruweelde panne	2,40 (0,93)	0,9
Jonge panne met lage Duindoorn	2,08	5,9

De LAI-waarde van de ontstruweelde pannen zonder de mosbedekking in acht te nemen, blijkt duidelijk overeen te komen met de optische LAI-bepaling. De sensor is immers te hoog om nog onder de lage mosbedekking te schuiven. De optische LAI-bepaling in de jonge panne

met lage Duindoorn resulteert in een hogere waarde dan de destructieve bepaling. Dit is wellicht te wijten aan het feit dat deze optisch bepaalde LAI niet enkel resulteert uit een afscherming van de sensor door het bladerdek, maar ook door de takken van de jonge Duindoorn struiken.

Tabel 22: Vergelijking tussen de destructieve en de optische LAI-bepaling voor struikvegetaties

Vegetatietype	Destructieve LAI-bepaling	Optische LAI-bepaling
Kruipwilg struweel	5,92	8,4
Kruipwilg struweel	4,45	6,6
Liguster struweel	2,86	6,6

Bij de struikvegetaties ligt de destructief bepaalde LAI steeds lager dan de optisch bepaalde LAI. Ook hier weer kan de oorzaak toegeschreven worden aan een bijkomende afscherming van de sensor door de takken.

*Indien men beide methoden om de LAI te begroten met elkaar vergelijkt komt men tot volgende besluiten.*

*(i) In de kruidvegetaties zal het bepalen van de LAI op een optische wijze wellicht niet steeds correcte LAI-waarden opleveren. Dit is te verklaren door het feit dat de sensor te hoog is om nog onder bepaalde planten te schuiven. Optische LAI-metingen zouden hierbij in bepaalde gevallen kunnen leiden tot een onderschatting van de werkelijke LAI.*

*(ii) Ook in de struikvegetaties blijkt de optische methode voor het bepalen van de LAI niet de geschikte resultaten op te leveren. Er wordt immers systematisch een overschatting gemaakt van de LAI, doordat de takken ook voor een zekere afscherming van de sensor zorgen. Daarenboven moeten bij de optische LAI-bepaling een aantal architectonische parameters worden opgegeven (bv. ELADP), die niet gekend zijn en dus kunnen leiden tot afwijkende LAI-waarden.*

#### *Optische LAI-bepaling in de proefvlakken*

Per proefvlak werden 9 puntmetingen op drie verschillende hoogtes uitgevoerd. Op die manier kon rekening gehouden worden met de ruimtelijke variatie van de LAI binnen de proefvlakken. Deze waarden kunnen worden vergeleken met de berekende LAI-waarden op basis van de destructief bepaalde waarden.

In Tabel 23 worden de destructief bepaalde LAI-waarden vergeleken met de optisch bepaalde LAI voor de kruidvegetaties.



Tabel 23: Vergelijking tussen de berekende LAI en de optisch bepaalde LAI voor kruidvegetatie

Proefvlak	Vegetatietype	Berekende LAI	Optisch bepaalde LAI
3	Pionierspanne	0,53	$0,7 \pm 0,4$
10a	Pionierspanne	0,30	$1,2 \pm 1,2$
4	Ontstruweelde panne	0,40	$0,5 \pm 0,4$
2	Jonge panne	0,40	$1 \pm 0,4$
10b	Jonge panne	0,30	$0,5 \pm 0,1$

Uit Tabel 23 blijkt dat in de meeste gevallen de berekende LAI lager ligt dan de optisch bepaalde. Voor de pionierspanne 10a is de standaardafwijking van de optisch bepaalde LAI-waarden zeer groot. In dit proefvlak stonden er verspreid kleine Duindoorn struiken. Een meting onder een dergelijke struik resulteert dan ook in een veel hogere LAI dan de veel ijlere omringende kruidvegetatie. Deze afwisseling van struiken en kruiden resulteert in een grote variatie van de metingen.

Er kan geen verband opgesteld worden tussen de berekende LAI-waarden en de optisch bepaalde LAI.

Tabel 24 geeft de vergelijking weer tussen de berekende LAI en de optisch bepaalde LAI voor de niet begraasde en gemaaide panne.

Tabel 24: Vergelijking tussen de berekende LAI en de optisch bepaalde LAI voor de niet begraasde en gemaaide panne

Proefvlak	Vegetatietype	Berekende LAI	Optisch bepaalde LAI
14b	Niet begraasde en gemaaide panne	3,19	$6,1 \pm 1,4$

In Tabel 25 worden de berekende LAI-waarden en de optische LAI voor de struikvegetaties met elkaar vergeleken.

Tabel 25: Vergelijking tussen de berekende LAI en de optisch bepaalde LAI voor struikvegetatie

Proefvlak	Vegetatietype	Berekende LAI	Optisch bepaalde LAI
13a	Liguster struweel	2,73	5,9 ± 1,4
6	Liguster struweel	1,45	6,6 ± 2,4
5	Kruipwilg-Duindoorn struweel	2,79	6,6 ± 1,2
8a	Kruipwilg-Duindoorn struweel	1,92	5,1 ± 1,6
8b	Kruipwilg-Duindoorn struweel	1,65	5,9 ± 0,9
9b	Kruipwilg-Duindoorn struweel	1,36	7,9 ± 1,1
12b	Gemengd struweel	3,03	5,3 ± 1,1
12a	Gemengd struweel	2,11	3,5 ± 1,1
9a	Gemengd struweel	1,58	7,4 ± 1,2
1	Gemengd struweel	1,56	4,6 ± 1,6
13b	Gemengd struweel	1,46	6,5 ± 1,3
7	Gemengd struweel	0,23	6,6 ± 1,3
11b	Jong Duindoorn struweel	0,63	4,7 ± 1,5

In Tabel 25 kan opnieuw duidelijk worden waargenomen dat de optische LAI-bepaling voor de struiken steeds een hogere waarde oplevert dan de berekende LAI. De berekende LAI is immers enkel gebaseerd op de bladoppervlakte, terwijl de optische LAI, zoals reeds eerder vermeld, ook het resultaat is van een gedeeltelijke afscherming van de sensor door takken. Er kan geen verband opgesteld worden tussen de berekende LAI-waarden voor de proefvlakken en de optisch bepaalde LAI.

*Ondanks het feit dat er voor beide vegetatietypes, kruiden en struiken, geen verband kan opgesteld worden tussen de berekende LAI-waarden en de optische bepaalde LAI, kunnen een aantal conclusies getrokken worden. Uit beide benaderingen volgt immers dat een struikvegetatie meestal een grotere LAI heeft dan een kruidvegetatie. Dus indien de berekende LAI-waarden voor de verschillende proefvlakken een zekere onzekerheid bevatten, dan treft die onzekerheid de beide vegetatietypes op een gelijke wijze. Op die manier blijft het wel nog mogelijk om kruid- en struikvegetaties met elkaar te vergelijken.*



## 4.2. Modelleren van de evapotranspiratie

Hierna wordt dieper ingegaan op de modellering van de evapotranspiratie volgens het FORUG-model dat gebaseerd is op Penman-Monteith (1965). In eerste instantie wordt besproken welke aanpassingen er moesten gebeuren aan het FORUG-model van Samson (2001) en Verbeeck (2002). Daarna worden enkele dagverlopen van de berekende evapotranspiratie geëvalueerd. Uiteindelijk wordt dieper ingegaan op het seizoenale verloop van de berekende evapotranspiratie.

### 4.2.1. Aanpassing van het FORUG-model

Zoals reeds vermeld in Tabel 19 en Tabel 20 (zie 4.1.2.1) werd per kruid- en struikvegetatie een gemiddelde LAI berekend op basis van de vegetatieopnames in de proefvlakken en een aantal destructieve bepalingen. Deze vermelde LAI-waarden zijn maximale waarden, aangezien ze gebaseerd zijn op vegetatiegegevens verzameld op het moment waarop de LAI maximaal is. De LAI vertoont echter een seizoenaal verloop waarmee als dusdanig rekening moet worden gehouden. Er kan verondersteld worden dat de LAI een lineaire stijging kent vanaf het moment dat de planten in blad komen tot het moment waarop de maximale LAI bereikt is. Dezelfde lineaire trend wordt eveneens aangenomen voor de afname van de LAI in het najaar. Er werd aangenomen dat voor alle planten (zowel kruiden als struiken) de bladontwikkeling start op 1 april (dag 91), de maximale LAI wordt bereikt op 15 mei (dag 135) en de bladval aanvangt op 15 september (dag 258). Voor de kruiden werd aangenomen dat deze bladval afneemt tot 15 november (dag 319), voor de struiken tot 1 december (dag 335).

Aan de hand van de maximale LAI-waarde voor de verschillende vegetatietypes werd de interceptiecapaciteit  $S_{ap}$  geschat. De maximale interceptiecapaciteit  $S_{ap,max}$  werd namelijk berekend aan de hand van een evenredigheidsfactor voor een gematigd loofbos tussen de maximale LAI en de  $S_{ap,max}$  (Samson, 2001). Deze evenredigheidsfactor werd dan gebruikt om de eigen gevonden maximale LAI-waarden om te rekenen naar een  $S_{ap,max}$ -waarde. De maximale interceptiecapaciteit  $S_{ap,max}$  evenals de maximale LAI en de gemiddelde hoogte worden weergegeven in Tabel 26, Tabel 27 en Tabel 28 voor respectievelijk de verschillende kruid- en struikvegetaties en de rietvegetatie.

Tabel 26: Fysiologische inputparameters voor de kruidvegetaties in het FORUG-model. Met  $LAI_{max}$  = maximale LAI-waarde, hoogte = gemiddelde hoogte van de vegetatie en  $S_{cap,max}$  = maximale interceptiecapaciteit

Vegetatietype	$LAI_{max}$ (-)	Hoogte (cm)	$S_{cap,max}$ (mm)
Ontstruweelde panne	0,40	20,00	0,0640
Jonge panne	0,40	17,25	0,0640
Pionierspanne	0,42	19,00	0,0672
Gemiddelde	0,41	18,75	0,0656

Tabel 27: Fysiologische inputparameters voor de struikvegetaties in het FORUG-model. Met  $LAI_{max}$  = maximale LAI-waarde, hoogte = gemiddelde hoogte van de vegetatie en  $S_{cap,max}$  = maximale interceptiecapaciteit

Vegetatietype	$LAI_{max}$ totaal (-)	$LAI_{max}$ struiken (-)	$LAI_{max}$ kruiden (-)	Hoogte struiken (cm)	Hoogte kruiden (cm)	$S_{cap,max}$ (mm)
Kruipwilg-Duindoorn struweel	1,93	1,81	0,12	125,0	38,0	0,3088
Liguster struweel	2,09	2,01	0,09	120,0	34,0	0,3344
Gemengd struweel	1,66	1,26	0,40	126,0	31,0	0,2656
Jong Duindoorn struweel	0,63	0,47	0,16	125,0	15,0	0,1008
Gemiddelde	1,58	1,39	0,19	124,0	29,5	0,2528

Tabel 28: Fysiologische inputparameters voor de niet begraasde en gemaaide panne (rietvegetatie) in het FORUG-model. Met  $LAI_{max}$  = maximale LAI-waarde, hoogte = gemiddelde hoogte van de vegetatie en  $S_{cap,max}$  = maximale interceptiecapaciteit

Vegetatietype	$LAI_{max}$	Hoogte (cm)	$S_{cap,max}$ (mm)
Niet begraasde en gemaaide panne	3,19	129	0,5104

Voor de parameters van de gebruikte stomatale weerstandsmodellen wordt verwezen naar paragraaf 4.1.2..

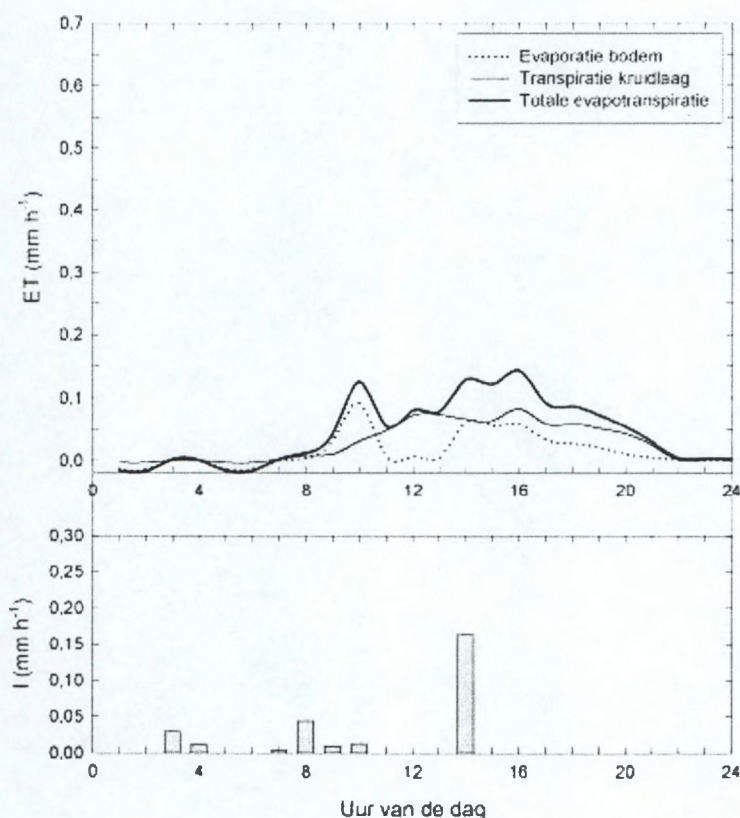
De resterende gewijzigde inputparameters werden reeds vermeld in Tabel 7. Voor de niet vermelde parameters werden vooropgestelde parameterwaarden gebruikt zoals vermeld in Samson (2001) en Verbeeck (2002).



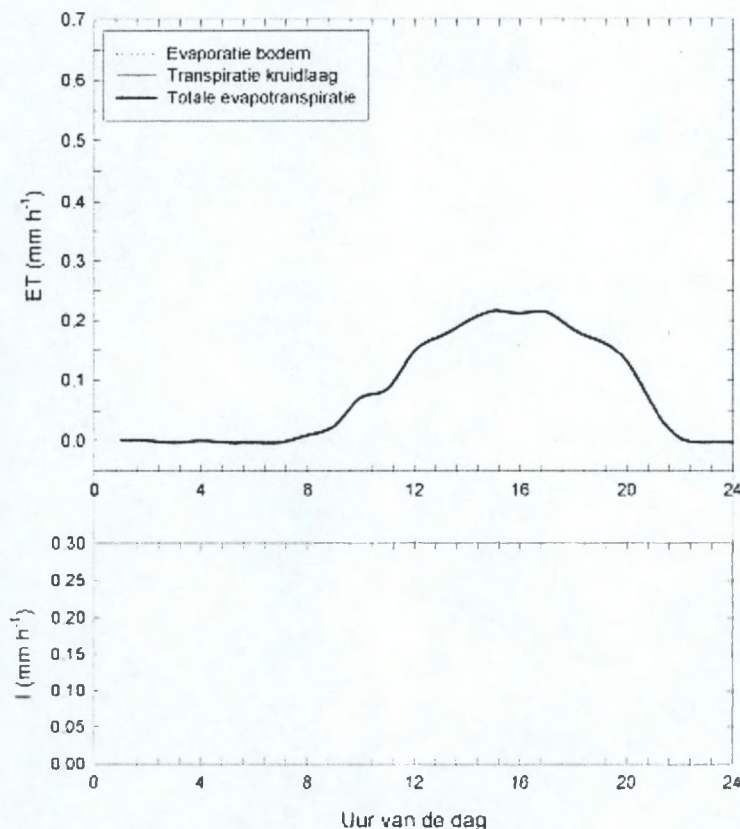
#### 4.2.2. Dagverloop van de berekende evapotranspiratie

Een dagverloop van de evapotranspiratie voor een gemiddelde kruidvegetatie voor een typische bewolkte dag (dag 217, 3 augustus 2002) en een typische zonnige dag (dag 227, 15 augustus 2002), wordt respectievelijk weergegeven in Figuur 29 en Figuur 30.

Een duidelijk diurnaal patroon wordt waargenomen, met nagenoeg geen verdamping 's nachts en een duidelijke transpiratie overdag. Dagsommen voor beide dagen bedragen respectievelijk 1,08 en 1,89 mm dag<sup>-1</sup>, wat realistische waarden zijn (Samson, 2001). Negatieve waarden gedurende de nacht en de ochtendperiode zouden wijzen op condensatie (dauwvorming), een fenomeen dat frequent visueel waargenomen werd op het veld. Er werd op de bewolkte dag 0,28 mm geïntercepteerde neerslag opnieuw rechtstreeks verdampt (Figuur 30). Tijdens de zonnige dag valt de transpiratiecurve ongeveer samen met de evapotranspiratiecurve omdat de bodemevaporatie zeer klein is (Figuur 29).



Figuur 29: Dagverloop van de evapotranspiratie van een gemiddelde kruidvegetatie voor een bewolkte dag (dag 217, 3 augustus 2002)



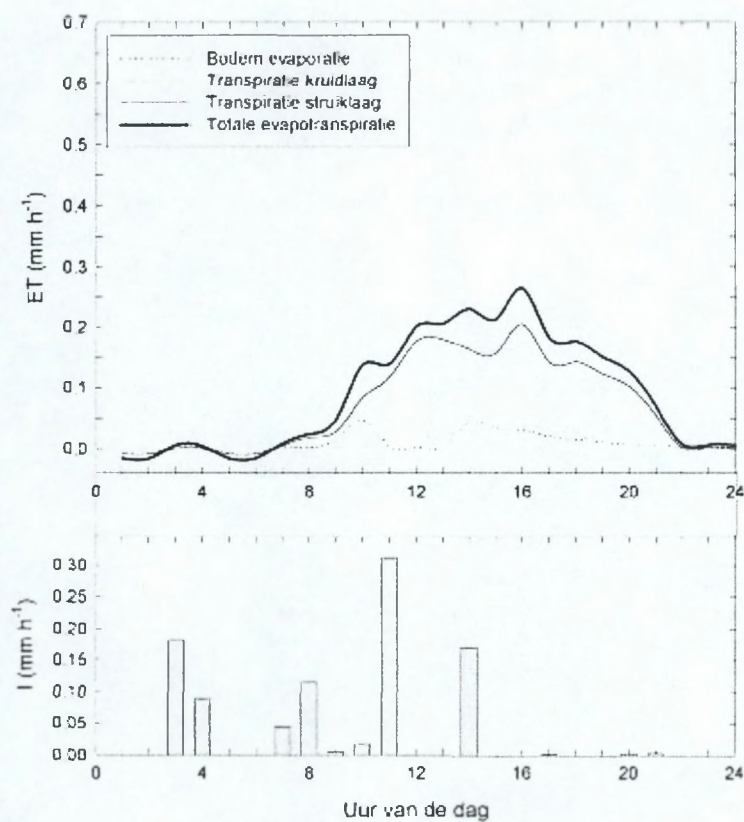
**Figuur 30:** Dagverloop van de evapotranspiratie van een gemiddelde kruidvegetatie voor een zonnige dag (dag 227, 15 augustus 2002)

Een dagverloop van de evapotranspiratie voor een gemiddelde struikvegetatie voor een typische bewolkte dag (dag 217, 3 augustus 2002) en een typische zonnige dag (dag 227, 15 augustus 2002), wordt weergegeven in Figuur 31 en Figuur 32.

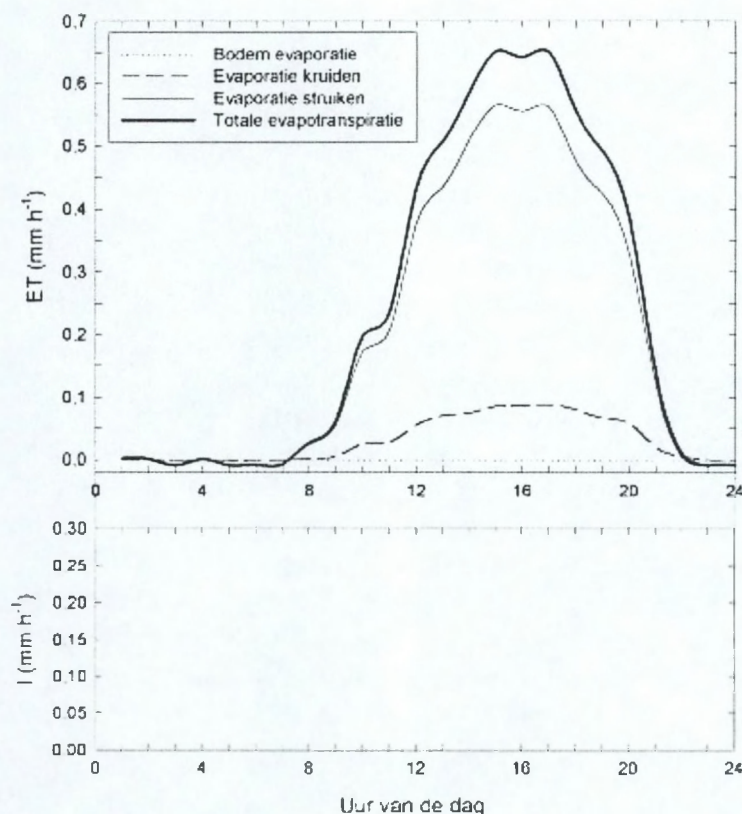
Opnieuw wordt een duidelijk diurnaal patroon waargenomen, met nagenoeg geen verdamping 's nachts en een duidelijke, voornamelijk, transpiratie overdag. De evapotranspiratie wordt door het FORUG-model geschat op 2,17 mm en 5,55 mm voor de bewolkte en de zonnige dag respectievelijk, en is duidelijk meer dan de evapotranspiratie geschat voor de kruidvegetatie. Binnen de totale evapotranspiratie van de gemiddelde struikvegetatie is het aandeel van de struiktranspiratie het grootst (86 % van de totale dagsom voor de zonnige dag), terwijl de kruidtranspiratie en de bodemevaporatie een min of meer gelijkaardige bijdrage hebben. De interceptieverdamping van 0,93 mm op de bewolkte dag is eveneens hoger dan de waarde berekend voor de kruidvegetatie door de grotere interceptiecapaciteit van de struikvegetatie (hogere LAI, en iets dikkere humuslaag) (zie Tabel 7, Tabel 26 en Tabel 27).



De hogere struikverdamping wordt voornamelijk verklaard door de hogere LAI van de struiken (Tabel 27).



Figuur 31: Dagverloop van de evapotranspiratie van een gemiddelde struikvegetatie voor een bewolkte dag (dag 217, 3 augustus 2002)

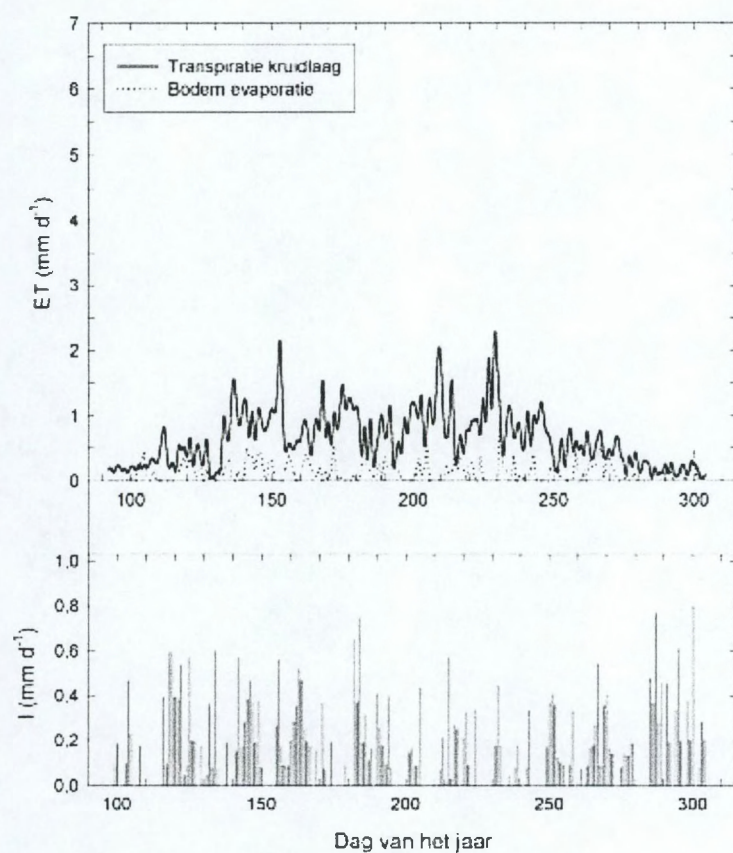


**Figuur 32: Dagverloop van de evapotranspiratie van een gemiddelde struikvegetatie voor een zonnige dag (dag 227, 15 augustus 2002)**

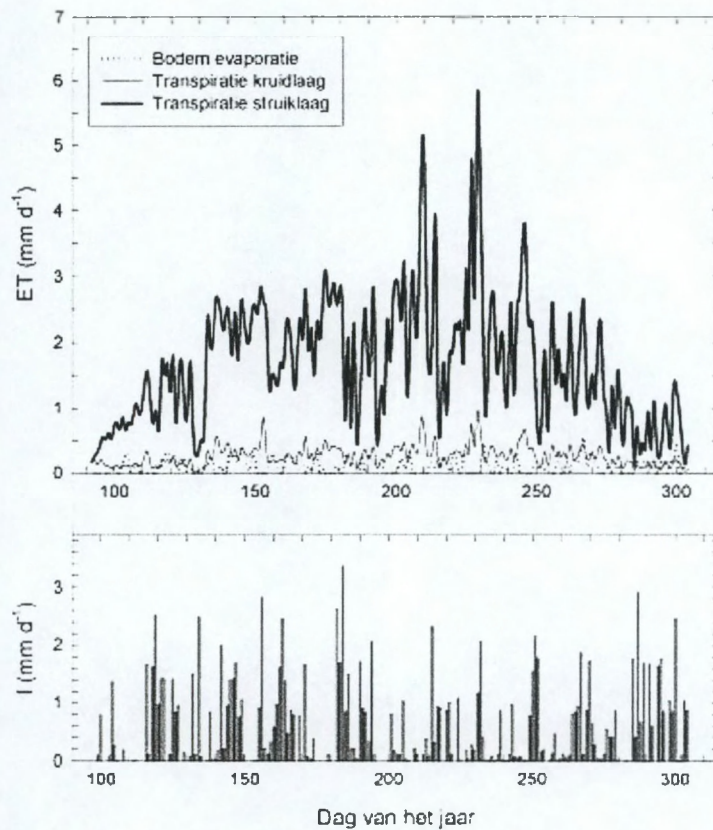
#### 4.2.3. Seizoensverloop van de berekende evapotranspiratie

De dynamiek van de seizoensverlopen voor een gemiddelde kruid- en struikvegetatie, worden respectievelijk weergegeven in Figuur 33 en Figuur 34. De gemodelleerde evapotranspiratie vertoont voor beide vegetatietypes een typisch seizoenaal verloop. Opvallend zijn opnieuw de duidelijk grotere evapotranspiratiewaarden waargenomen voor de struikvegetaties dan voor de kruidvegetaties.





Figuur 33: Seizoenaal verloop van de evapotranspiratie van een gemiddelde kruidvegetatie



**Figuur 34:** Seizoenaal verloop van de evapotranspiratie van een gemiddelde struikvegetatie

In Tabel 29, Tabel 30 en Tabel 31 worden de gecumuleerde evapotranspiratiewaarden voor het volledige groeiseizoen gegeven voor respectievelijk de kruiden, de struiken en de niet begraasde en gemaaide panne. In deze tabellen wordt zowel de evapotranspiratie met als zonder interceptieverdamping gegeven.



Tabel 29: Evapotranspiratie  $E_t$  (mm) met en zonder interceptie voor de verschillende kruidvegetatietypes (dag 92 tot en met dag 305)

Vegetatietype	Laag	$E_t$	$E_t$
		zonder interceptie	met interceptie
Gemiddelde kruidvegetatie	Bodemlaag	26	49
	Kruidlaag	138	150
	Totaal	165	199
Ontstruweelde panne	Bodemlaag	26	42
	Kruidlaag	136	147
	Totaal	162	189
Jonge panne	Bodemlaag	27	58
	Kruidlaag	135	147
	Totaal	162	205
Pionierspanne	Bodemlaag	26	56
	Kruidlaag	141	154
	Totaal	167	209

Tabel 30: Evapotranspiratie  $E_t$  (mm) met en zonder interceptie voor de verschillende struikvegetatietypes (dag 92 tot en met dag 305)

Vegetatietype	Laag	$E_t$	$E_t$
		zonder interceptie	met interceptie
Gemiddelde struikvegetatie	Bodemlaag	22	100
	Kruidlaag	55	60
	Struiklaag	357	395
	Totaal	434	554
Kruipwilg- Duindoorn struweel	Bodemlaag	21	101
	Kruidlaag	36	39
	Struiklaag	407	447
	Totaal	464	587
Liguster struweel	Bodemlaag	21	102
	Kruidlaag	29	31
	Struiklaag	426	471
	Totaal	476	604
Gemengd struweel	Bodemlaag	21	103
	Kruidlaag	97	106
	Struiklaag	340	372
	Totaal	458	580
Jong Duindoorn struweel	Bodemlaag	23	109
	Kruidlaag	61	65
	Struiklaag	185	199
	Totaal	270	373

Tabel 31: Evapotranspiratie  $E_t$  (mm) met en zonder interceptie voor de niet begraasde en gemaaide panne (dag 92 tot en met dag 305)

Vegetatietype	Laag	$E_t$	$E_t$
		zonder interceptie	met interceptie
Niet begraasde en gemaaide panne	Bodemlaag	21	42
	Kruidlaag	438	497
	Totaal	458	540

Wat betreft de verschillende onderscheiden kruidvegetaties is de totale seizoensevapotranspiratie, evenals het aandeel van de bodemevaporatie en de kruidtranspiratie zeer gelijkaardig. Rekening houdend met de interceptieverdamping blijkt dat de stijging in de totale bestandsevapotranspiratie voornamelijk te wijten is aan de bodeminterceptie. Voor de kruidvegetatie is de totale evapotranspiratie met of zonder interceptie vrij laag, zeker aangezien men dergelijke kruidvegetaties aantreft in proefvlakken met een hoge grondwatertafel (zie 4.4.).

Ook wat de verschillende struikvegetaties betreft liggen de totale evapotranspiratiewaarden vrij dicht bijeen (zie Tabel 30). Een uitzondering hierop vormt het jong Duindoorn struweel. De lage evapotranspiratiewaarden voor deze vegetatie kunnen verklaard worden door de lage LAI-waarde (zie Tabel 27). De grootste bijdrage tot de totale struiksevapotranspiratie wordt gevormd door de struiken zelf. Afhankelijk van de LAI-waarden (zie Tabel 27) is de kruidtranspiratie hoger dan de bodemevaporatie (struikvegetatie gemengd struweel). Bij het Liguster struweel is de kruidtranspiratie nagenoeg gelijk aan de bodemevaporatie. Als rekening wordt gehouden met de interceptie in de struikvegetatie, dan worden beduidend hogere evapotranspiratiewaarden gevonden dan wanneer deze factor achterwege gelaten wordt. Net zoals bij de kruiden het geval was, blijkt de interceptie van neerslagwater door de bodem ook hier weer het belangrijkste. De waarden gevonden voor struiksevapotranspiratie komen overeen met waarden gevonden voor bodesevapotranspiratie (Samson 2001), en zijn duidelijk hoger dan de waarden gevonden voor de kruidvegetaties. Ook in ander onderzoek is gebleken dat de evapotranspiratiewaarden van verschillende ecosystemen verbazend dicht bij elkaar kunnen liggen (Verstraeten *et al.*, 2001).

De verdamping van de (kruidachtige) rietvegetatie is veel hoger dan van de andere kruidvegetaties. Dit is in overeenstemming met de hoge evapotranspiratiewaarden voor Riet die eveneens gevonden werden door andere auteurs (o.a. Van Brempt, 1994; Herbst *et al.*, 1999).

Voor de bodemevaporatie in de kruidvegetaties lijkt vrij klein te zijn. De lage LAI van de kruidvegetaties doet echter vermoeden dat de bodemevaporatie groter is. Er zal waarschijnlijk in deze kruidvegetaties immers vrij veel energie ter beschikking zijn van de bodem voor



verdamping. De lage bodemevaporatiewaarden kunnen te wijten zijn aan het gebruikte submodel voor de berekening van de bodemevaporatie. Hiervoor werd namelijk gebruik gemaakt van een empirisch model dat opgesteld werd voor bossen (Herbst *et al.*, 1999). Er kan dus vermoed worden dat de absolute bodemverdampingswaarden minder betrouwbaar zijn. Echter, aangezien er zowel voor de berekening van de evapotranspiratie van de kruid- als de struikvegetaties gebruik gemaakt is van dit model, kan worden verwacht dat de relatieve verhouding tussen beide wel correct is. De bodemevaporatie blijkt voor beide vegetatietypes min of meer gelijk te zijn.

*Algemeen kan dus worden gesteld dat de verdamping van de kruidvegetaties in de duinvalleien duidelijk minder is dan deze van de struikvegetaties. Verklaringen hiervoor kunnen hoofdzakelijk gevonden worden in hogere LAI-waarden, een grotere ruwheid en een grotere interceptiecapaciteit van de struikvegetaties.*

### 4.3. Bodemonderzoek

#### 4.3.1. Indringingsweerstand

De meetresultaten van de prikboormetingen voor respectievelijk de kruidvegetaties, de niet begraasde en gemaaide panne en de struikvegetaties, worden weergegeven in Tabel 32, Tabel 33 en Tabel 34. De weerstandswaarden zijn gemiddelde waarden van 8 metingen. De meting in het centrum van het proefvlak werd dus niet meegenomen in de berekeningen. Deze waarde bleek immers zeer vaak van de andere waarden af te wijken. Dit is wellicht te wijten aan het feit dat het bodemprofiel in het centrum van het proefvlak verstoord werd door de grondboringen die plaatsvonden in april 2002 om de peilbuizen te plaatsen. Telkens wordt ook de standaarddeviatie op de metingen vermeld.

Tabel 32: Meetresultaten van de gemiddelde prikboormetingen (n=8) in de kruidvegetaties

Vegetatie- type	Proefvlak- nummer	Lage weerstand (cm)		Hoge weerstand (cm)	
		Gemiddelde	STD	Gemiddelde	STD
Jonge panne	2	11	5	26	13
Jonge panne	10b	81	24	91	16
Jonge panne	10c	25	7	50	25
Jonge panne met lage Duindoorn	11a	34	9	50	13
Ontstruweelde panne	4	13	3	28	7
Ontstruweelde panne	14a	16	10	32	19
Pionierspanne	3	30	5	54	13
Pionierspanne	10a	46	9	59	12

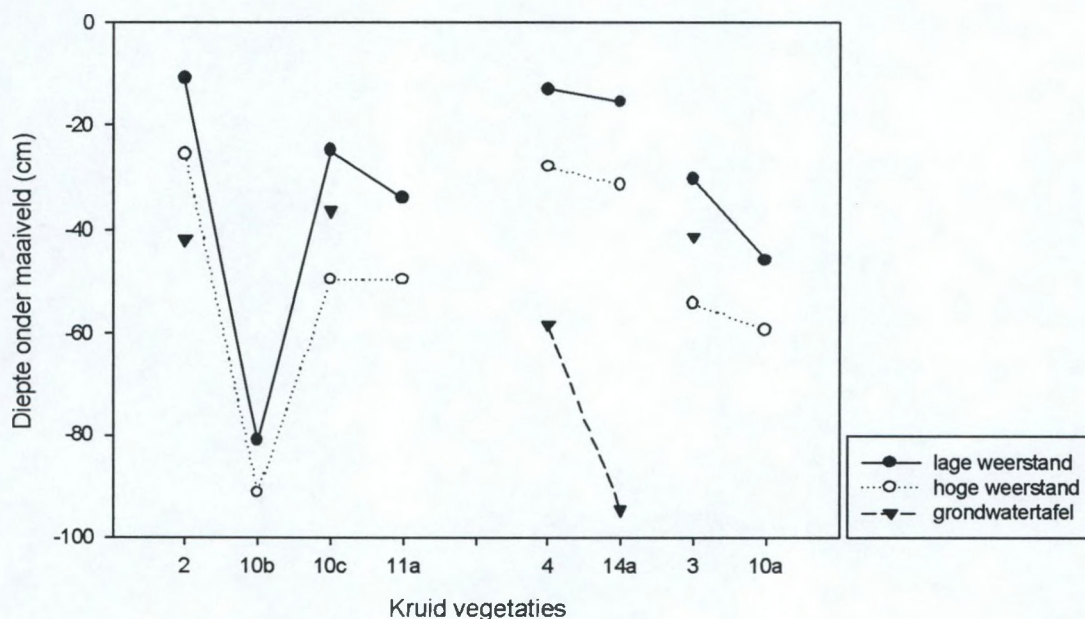
Uit bovenstaande resultaten voor de kruidvegetaties blijkt dat er bijna op alle locaties een grotere standaardafwijking op de hoge weerstanden bestaat dan op de lage weerstanden. Dit is niet het geval voor de metingen in proefvlak 10b. De bekomen weerstandswaarden voor deze jonge panne doen echter vermoeden dat het om een foute meting gaat. Wellicht was de weerstandsafname zo subtiel dat ze bij het opmeten niet correct werd ingeschat. Er zal in het vervolg dan ook geen rekening meer gehouden worden met de prikboormetingen in dit proefvlak 10b.

De minimale lage weerstand bedraagt 11 cm en werd aangetroffen in een jonge panne. De maximale lage weerstand bedraagt 46 cm en werd aangetroffen in een pionierspanne. De



minimale hoge weerstand bedraagt 26 cm en werd opnieuw aangetroffen in een jonge panne. De maximale hoge weerstand bedraagt 56 cm en werd aangetroffen in een pionierspanne.

De bekomen resultaten kunnen gerelateerd worden aan de diepte van de grondwatertafel op het moment van de prikboormetingen. De diepte van de grondwatertafel werd berekend als de gemiddelde diepte van de grondwatertafel op de dag van de prikboormetingen (12 oktober 2002). In Figuur 35 wordt de relatie tussen de diepte van de grondwatertafel en de prikboormetingen weergegeven voor de verschillende kruidvegetaties. De weerstandswaarden worden hierbij uitgedrukt in dieptes onder het maaiveld. Op die manier kan de relatie met de grondwatertafeldiepte beter gelegd worden. Het is echter wel zo dat er niet voor alle kruidvegetaties grondwatertafeldata voorhanden zijn in deze periode. Bepaalde dataloggers moesten immers de grondwatertafel opvolgen in twee of drie proefvlakken zodat er in bepaalde periodes data ontbreken voor deze proefvlakken. In Figuur 35 wordt enkel de grondwatertafeldiepte aangeduid indien de data beschikbaar zijn.

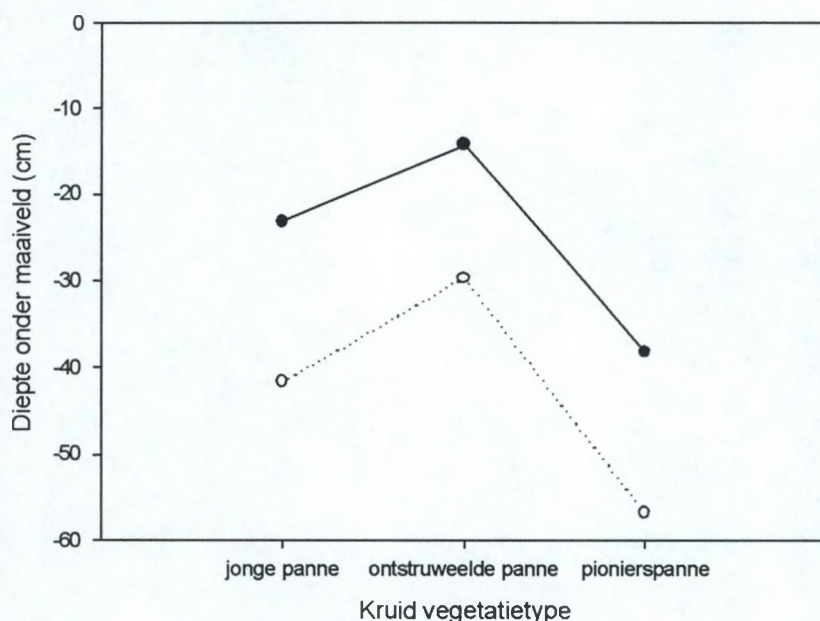


Figuur 35: Lage en hoge indringingsweerstand en diepte van de grondwatertafel onder de verschillende kruidvegetaties. Met proefvlakken 2, 10b, 10c en 11a = jonge panne; 4 en 14a = ontstruweelde panne; 3 en 10a = pionierspanne

Uit Figuur 35 valt ten eerste de zeer hoge en wellicht onwaarschijnlijke weerstandswaarde op in het proefvlak 10b. Uit de grafiek blijkt ook dat er niet direct een verband kan opgesteld worden tussen de diepte van de grondwatertafel en de weerstanden. Dit geldt zowel voor de

hoge als voor de alge weerstanden. Wellicht is dit gedeeltelijk te wijten aan het feit dat er slechts een beperkt aantal data voorhanden zijn.

Voor de verschillende kruidvegetatietypes kan de gemiddelde lage en hoge weerstand berekend en met elkaar vergeleken worden. Dit wordt weergegeven in Figuur 36. Voor de berekening van de gemiddelde indringingsweerstand onder een jonge panne werden de meetwaarden bekomen onder proefvlak 10b niet in rekening gebracht. Zoals reeds vermeld waren deze weerstandswaarden wellicht te hoog.



Figuur 36: Gemiddelde lage en hoge indringingsweerstand per kruidvegetatietype

De gemiddelde indringingsweerstand onder de ontstruweelde panne ( $14 \pm 7$  cm en  $30 \pm 13$  cm) is kleiner dan onder de jonge panne ( $23 \pm 7$  cm en  $42 \pm 17$  cm) en de pionierspanne ( $38 \pm 7$  cm en  $57 \pm 13$  cm). Uit de standaardafwijking volgt dat het verschil in indringingsweerstand tussen de verschillende kruidvegetaties klein is. De eventuele verklaring voor het feit dat er in de ontstruweelde panne een iets lagere indringingsweerstand wordt opgemeten is dat de bodem door de ontstruweling gecompecteerd werd.

De gemiddelde lage weerstand voor alle kruiden samen bedraagt  $25 \pm 7$  cm. De gemiddelde hoge weerstand voor alle kruiden samen bedraagt  $43 \pm 15$  cm.



Tabel 33: Meetresultaten van de gemiddelde prikboormetingen (n=8) in de niet begraasde en gemaaide panne

Vegetatie-type	Proefvlak-nummer	Lage weerstand (cm)		Hoge weerstand (cm)	
		Gemiddelde	STD	Gemiddelde	STD
Niet begraasde en gemaaide panne	14b	39	4	61	6

De lage weerstand onder de niet begraasde en gemaaide panne bedraagt  $39 \pm 4$  cm. De hoge weerstand bedraagt  $61 \pm 6$  cm.

Deze data kan niet worden gerelateerd aan de grondwatertafeldiepte omdat er geen data over de grondwatertafel beschikbaar zijn voor deze periode.

Tabel 34: Meetresultaten van de gemiddelde prikboormetingen (n=8) in de struikvegetaties

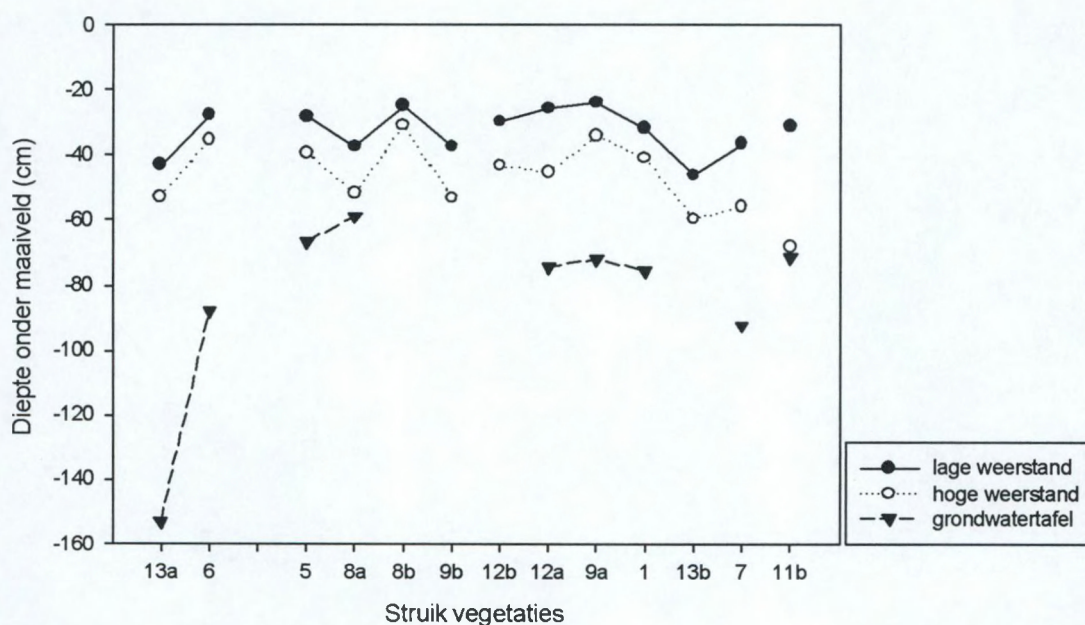
Vegetatie-type	Proefvlak-nummer	Lage weerstand (cm)		Hoge weerstand (cm)	
		Gemiddelde	STD	Gemiddelde	STD
Liguster struweel	13a	43	11	53	10
Liguster struweel	6	28	3	35	5
Kruipwilg-Duindoorn struweel	5	28	11	40	13
Kruipwilg-Duindoorn struweel	8a	38	4	52	10
Kruipwilg-Duindoorn struweel	8b	25	4	31	3
Kruipwilg-Duindoorn struweel	9b	38	5	53	9
Gemengd struweel	12b	30	5	43	4
Gemengd struweel	12a	26	2	46	11
Gemengd struweel	9a	24	3	34	4
Gemengd struweel	1	32	11	41	11
Gemengd struweel	13b	46	9	60	15
Gemengd struweel	7	37	5	56	10
Jong Duindoorn struweel	11b	31	12	68	5

De minimale lage weerstand onder de opgemeten struikvegetaties bedraagt 24 cm en wordt aangetroffen onder een gemengd struweel (9a). De maximale lage weerstand bedraagt 46 cm en wordt eveneens aangetroffen onder een gemengd struweel. De minimale hoge weerstand onder de opgemeten struikvegetaties bedraagt 31 cm en wordt aangetroffen onder een

Kruipwilg-Duindoorn struweel (8b). De maximale hoge weerstand bedraagt 68 cm en wordt aangetroffen onder het jong Duindoorn struweel (11b).

In tegenstelling tot de kruidvegetaties is de standaardafwijking op de metingen niet steeds groter bij de hoge weerstandsmetingen dan bij de lage weerstanden.

Voor de verschillende weerstandsmetingen kan opnieuw worden nagegaan of er al dan niet een verband bestaat met de grondwatertafeldiepte. Dit wordt weergegeven in Figuur 37. De weerstandswaarden worden opnieuw uitgedrukt als een diepte onder het maaiveld. Opnieuw zijn er om bovenvermelde redenen niet altijd grondwatertafeldata aanwezig. Indien er grondwatertafeldata beschikbaar zijn, worden deze aangeduid in de grafiek.

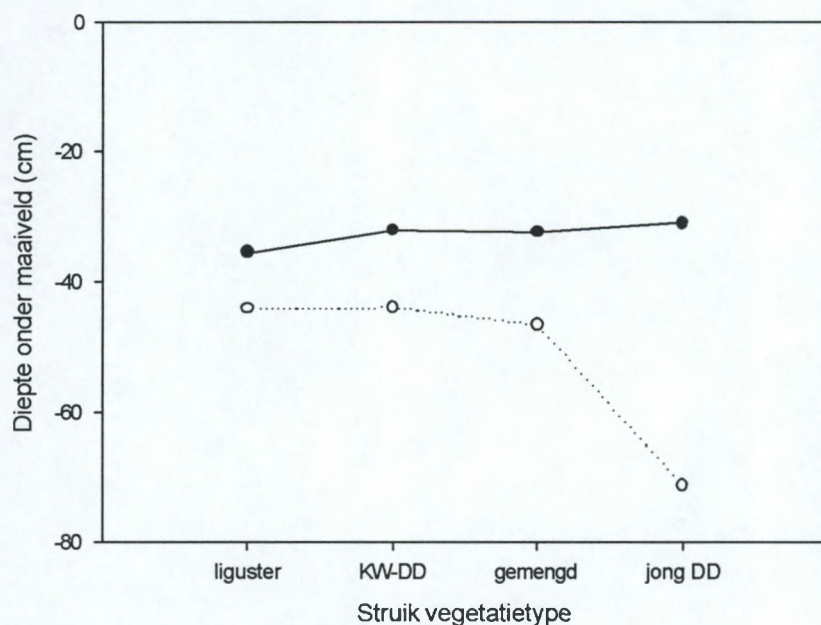


Figuur 37: Lage en hoge indringingsweerstand en diepte van de grondwatertafel onder de verschillende struikvegetaties. Met proefvlakken 13a en 6 = Liguster struweel; 5, 8a, 8b en 9b = Kruipwilg-Duindoorn struweel; 12b, 12a, 9a, 1, 13b en 7 = gemengd struweel; 11b = jong Duindoorn struweel

Net zoals het geval was voor de struikvegetaties kan er ook voor de struikvegetaties geen duidelijk verband gevonden worden tussen de diepte van de grondwatertafel en de indringingsweerstand. Onder het Liguster struweel gaat een kleinere indringingsweerstand gepaard met een minder diepe grondwatertafel, terwijl het omgekeerde het geval is onder het Kruipwilg-Duindoorn struweel. Ook hier weer is de dataset te beperkt om duidelijke conclusies te kunnen trekken.



Voor de verschillende struikvegetaties kan de gemiddelde lage en hoge indringingsweerstand worden berekend. Dit wordt voorgesteld in Figuur 38.



Figuur 38: Gemiddelde lage en hoge indringingsweerstand per struikvegetatietype. Met liguster = Liguster struweel; KW-DD = Kruipwilg-Duindoorn struweel; gemengd = gemengd struweel; jong DD = jong Duindoorn struweel

De gemiddelde lage indringingsweerstand voor de struikvegetatietypes liggen zeer dicht bij elkaar: Liguster struweel 35 cm, Kruipwilg-Duindoorn struweel 32 cm, gemengd struweel 32 en jong Duindoorn struweel 31 cm. De gemiddelde hoge weerstanden liggen zeer dicht bij elkaar onder het Liguster struweel, Kruipwilg-Duindoorn struweel en het gemengd struweel. Respectievelijk bedraagt deze gemiddelde hoge weerstand 44 cm, 44 cm en 47 cm. De gemiddelde hoge weerstand onder het jong Duindoorn struweel is groter en bedraagt 71 cm. De oorzaak voor deze hogere weerstand onder het jong Duindoornstruweel is niet gekend.

De gemiddelde lage indringingsweerstand onder de bemonsterde struikvegetaties bedraagt  $33 \pm 7$  cm. De gemiddelde hoge indringingsweerstand bedraagt  $51 \pm 8$  cm. Deze waarden liggen in dezelfde grootte-orde als deze van Ampe (1999).

*Uit het voorgaande is gebleken dat de gemiddelde lage en hoge indringingsweerstand onder de kruidvegetaties lager is dan onder de struikvegetaties. Respectievelijk bedragen de gemiddelde lage en hoge indringingsweerstand voor de kruid- en struikvegetatie  $25 \pm 7$  cm en  $33 \pm 7$  cm (lage indringingsweerstand),  $43 \pm 15$  cm en  $51 \pm 8$  cm (hoge indringingsweerstand). Uit de standaardafwijking op beide gemiddelde weerstandswaarden kan echter worden afgeleid dat het bereik ervan voor de beide onderzochte vegetaties elkaar overlapt.*

#### 4.3.2. Wortelonderzoek

De bewortelingsdiepte werd bepaald aan de hand van grondboringen. Uit de resultaten kon zowel de gemiddelde bewortelingsdiepte van elke vegetatietype worden bepaald, als de verticale worteldistributie in de bodem. De wortels werden verdeeld in twee fracties: de dikkere wortels en de fijnere wortels. Aangezien deze scheiding echter niet steeds gemakkelijk te maken was, werden de beide fracties bij de verdere verwerking steeds samengeteld.

##### 4.3.2.1. Bewortelingsdiepte

In eerste instantie zal hier dieper worden ingegaan op de bewortelingsdiepte onder kruidvegetaties. Daarna zal de bewortelingsdiepte onder struikvegetaties behandeld worden.

Onder kruidvegetaties werd de bewortelingsdiepte bepaald onder twee vegetatietypes: een ontstruweelde panne en een jonge panne. De gemiddelde bewortelingsdiepte werd per onderzochte vegetatietype berekend uit twee van de vijf puntmetingen. Deze selectie van slechts twee puntmetingen gebeurde omdat het extraheren van de wortels uit de bodem veel tijd in beslag nam. De gemiddelde bewortelingsdiepte voor de ontstruweelde panne bedraagt 60 cm, terwijl dit bij de jonge panne gemiddeld 45 cm is. Er kan echter niet met zekerheid worden gesteld dat er dieper in de bodem geen wortels meer voorkomen, aangezien het bij beide vegetatietypes onmogelijk was om de diepere bodemlagen te onderzoeken. Dieper boren was immers onmogelijk wegens de nabijheid van de grondwatertafel. Wanneer echter mag aangenomen worden dat de bewortelingsdiepte vooral afhankelijk is van de nutriënten- en watervoorziening, dan zullen er vermoedelijk dieper in de bodem zeer weinig tot geen wortels meer voorkomen. Zowel bij de ontstruweelde als bij de jonge panne, stemt de bewortelingsdiepte immers overeen met de laagste grondwaterstand (gedurende de opgemeten periode), waardoor de plant wellicht over voldoende water zal beschikken gedurende het volledige groeiseizoen. Een opmerking die hierbij echter wel kan worden gemaakt, is dat er gedurende het jaar 2002 veel neerslag viel, zodat het wel mogelijk is dat er tijdens drogere



jaren wel droogtestress kan optreden. In de verzadigde bodemlagen zijn de poriën bovendien volledig met water gevuld waardoor er zuurstofdeficiëntie optreedt en de wortels geen water aan deze bodemlagen kunnen onttrekken (Bakker, 1981). De plant zal vermoedelijk ook over voldoende nutriënten beschikken, aangezien de nutriëntenconcentratie meestal groter is in de bovenste bodemlagen (Schenk *et al.*, 2002). Dit komt ook overeen met de bevindingen van Ampe en Langohr (1993), waarin zij stellen dat de bewortelingsdiepte van de planten in de duinen afhankelijk is van de dikte van de biologisch actieve Albi en Bbi horizonten.

Het verschil in bewortelingsdiepte onder een ontstruweelde panne en een jonge panne kan verschillende oorzaken hebben. Een eerste mogelijke verklaring is de grondwaterstand onder beide kruidachtige vegetaties. De grondwaterstand onder de jonge panne is hoger dan onder de ontstruweelde panne, waardoor diepere wortels in de jonge panne niet kunnen overleven. Ook de vegetatiesamenstelling kan de oppervlakkerigere beworteling onder de jonge panne verklaren. De vegetatie in de jonge panne bestaat voornamelijk uit een lage, jonge en homogene kruipwilgvegetatie, terwijl in de ontstruweelde panne een oudere, heterogene vegetatie voorkomt. Volgens Schenk *et al.* (2002) neemt de bewortelingsdiepte meestal toe in functie van de grootte en de leeftijd van de plant. De hier opgemeten resultaten lijken dit te bevestigen. Daarnaast treedt in de homogenere jonge panne vermoedelijk minder competitie op en moeten planten er minder diep wortelen om voldoende nutriënten ter beschikking te hebben. Een laatste mogelijke verklaring voor het verschil in bewortelingsdiepte is de volgende. Bij het wortelonderzoek werd niet nagegaan van welke planten de wortels afkomstig waren. Daardoor is het niet uitgesloten dat de diepere wortels onder de ontstruweelde panne restanten zijn van het vroegere struweel. Onderzoek naar de vitaliteit van de opgegraven wortels zou hier uitsluitel kunnen brengen, maar was in het kader van dit beperkt onderzoek niet realiseerbaar.

De bewortelingsdiepte voor de struiken werd bepaald voor drie vegetatietypes: een Kruipwilg struweel, een Duindoorn struweel en een Liguster struweel. De gemiddelde bewortelingsdiepte voor deze drie vegetaties bedraagt respectievelijk 45cm, 55 cm en 60 cm, wat in dezelfde grootte-orde ligt dan de opgemeten bewortelingsdieptes voor de kruidvegetaties. Ook hier kan niet met zekerheid gesteld worden dat er dieper geen wortels meer voorkomen. Het was immers niet mogelijk om diepere grondmonsters op te boren, doordat de wanden van de boorput telkens inzakten. Bij het Kruipwilg en het Duindoorn struweel werd het boren ook verhinderd door de aanwezigheid van de grondwatertafel. Volgens Ampe en Langohr (1993) kan echter verondersteld dat de meeste wortels zich in de aangeboorde zones bevinden. Zij stellen immers dat de meeste wortels geconcentreerd zijn in de Albi en de Bbi horizont, welke in de depressies tot 65 cm dik kunnen zijn. Uit het onderzoek van Ampe en Langohr (1993) bleek wel dat sommige wortels dieper kunnen wortelen in verticale gallerijen van dode wortels.

*Uit het onderzoek van de maximale bewortelingsdiepte bij kruid- en struikvegetaties kan er geen duidelijk verschil gevonden worden tussen de verschillende vegetaties*

#### 4.3.2.2. Relatie tussen de bewortelingsdiepte en de indringingsweerstand van de bodem

De bewortelingsdiepte wordt onder meer beïnvloed door de indringingsweerstand van de bodem (Baes, 1989). De indringingsweerstand is immers een maat voor de weerstand die de bodem kan leveren tegen wortelpenetratie (Ampe, 1999).

Op de plaatsen van de wortelboringen werd eveneens de indringingsweerstand opgemeten met de prikboor.

In Tabel 35 en Tabel 36 wordt de bewortelingsdiepte en de gemiddelde lage en hoge weerstand weergegeven voor respectievelijk de onderzochte kruid- en struikvegetaties.

**Tabel 35: Bewortelingsdiepte, lage en hoge indringingsweerstand voor de bemonsterde kruidvegetaties**

Vegetatietype	Bewortelingsdiepte (cm)	Lage weerstand (cm)	Hoge weerstand (cm)
Ontstruweelde panne	-60 cm	25 cm	46 cm
Jonge panne	-45 cm	15 cm	28 cm

Uit Tabel 35 kan afgeleid worden dat er blijkbaar bij de kruidvegetaties wel nog wortels voorkomen onder de gecompacteerdde lagen. De verdeling van de wortels in functie van de diepte kan weergegeven welke fractie van de wortels zich nog op deze diepte bevindt. Dit wordt verder nog behandeld (zie 4.3.2.3.).

**Tabel 36: Bewortelingsdiepte, lage en hoge indringingsweerstand voor de bemonsterde struikvegetaties**

Vegetatietype	Bewortelingsdiepte (cm)	Lage weerstand (cm)	Hoge weerstand (cm)
Kruipwilg struweel	-45 cm	42 cm	86 cm
Duindoorn struweel	-55 cm	25 cm	70 cm
Liguster struweel	-60 cm	-- (*)	-- (*)

\* ontbrekende waarde

Uit Tabel 36 kan afgeleid worden dat de bewortelingsdiepte steeds groter is dan de lage weerstand, maar de waarde van de hoge weerstand niet overschrijdt. Ook hier weer kan meer



duidelijkheid verkregen worden aan de hand van de wortelverdeling in functie van de diepte (zie 4.3.2.3.).

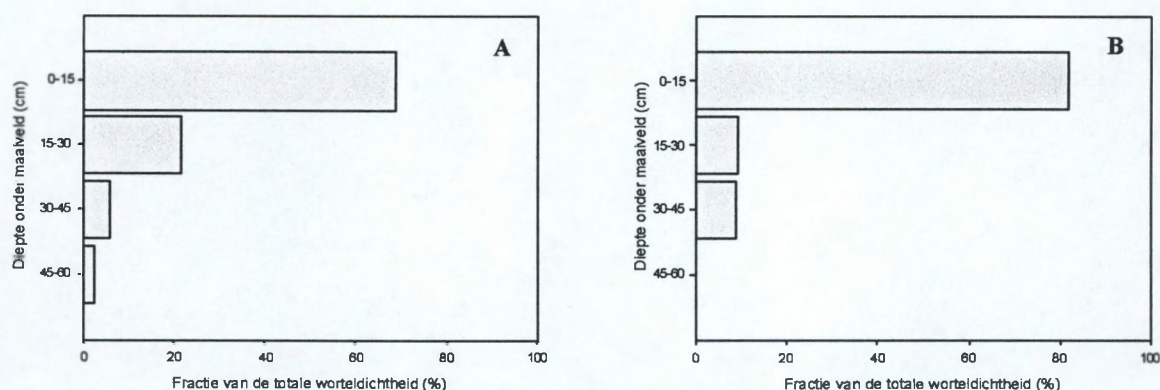
#### 4.3.2.3. Verticale worteldistributie

De verticale verdeling van de wortels in de bodem kan een idee geven over de zone waarin de nutriënten- en wateropname door de plant gebeurt. Dergelijke waarnemingen zijn onder meer bruikbaar om conclusies te trekken naar het voorkomen van eventuele tijdelijke watertekorten bij de plant. Dit kan relevante informatie opleveren in verband met de transpiratiedynamiek van de planten.

De verticale worteldistributie van de onderzochte vegetatietypes werd berekend als een gemiddelde waarde van twee van de vijf puntmetingen. Zoals reeds eerder vermeld gebeurde deze selectie van slechts twee puntmetingen omdat het extraheren van de wortels uit de bodem veel tijd in beslag nam. In eerste instantie werd de totale wortelbiomassa per bodemvolume ( $\text{g m}^{-3}$ ) berekend. Deze waarden werden dan omgerekend naar percentages van de totale wortelbiomassa in het aangeboorde bodemvolume. Deze berekening werd uitgevoerd door de aangeboorde grondkolom te verdelen in zones van 15 cm (0-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm en 45-60 cm). Aangezien echter tijdens het veldwerk de grondboringen nog verder opgesplitst werden (zie paragraaf 3.5.2.), werd deze gedetailleerde worteldistributie eveneens bepaald.

Hierna wordt eerst de verticale worteldistributie onder de onderzochte kruidvegetaties behandeld, daarna zal dieper ingegaan worden op de verticale worteldistributie onder de onderzochte struikvegetaties.

In Figuur 39 wordt de gemiddelde worteldistributie onder een ontstruweelde panne en een jonge panne weergegeven.

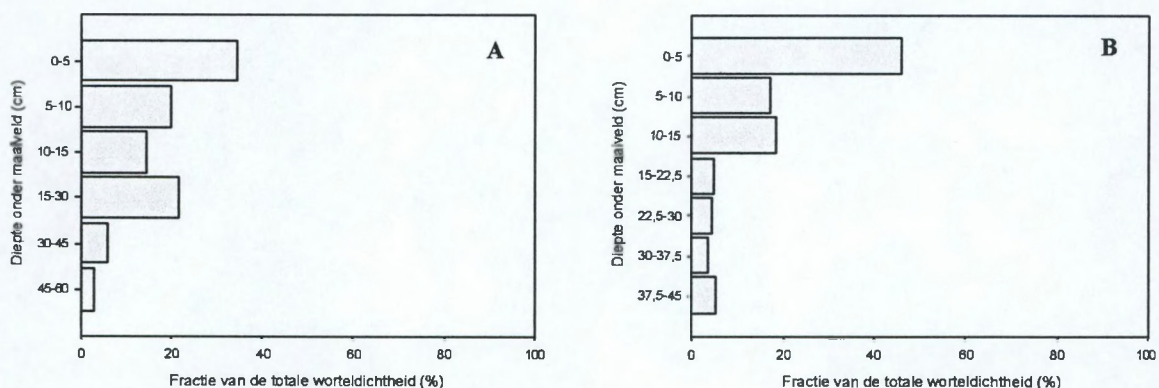


Figuur 39: Gemiddelde verticale worteldistributie onder (A) de ontstruweelde panne en (B) de jonge panne

In beide onderzochte kruidvegetaties concentreert 60 tot 70 % van de wortels zich in de bovenste 15 cm. In de ontstruweelde panne wordt 91 % van de totale wortelhoeveelheid aangetroffen in de bovenste 30 cm. Dit blijkt in overeenstemming te zijn met de opgemeten lage indringingsweerstand onder deze vegetatie. Deze bedraagt immers gemiddeld 25 cm. In de jonge panne bevindt 82 % van de wortels zich in de bovenste 15 cm. Ook hier blijkt duidelijk dat de kruidachtige vegetatie niet in staat is om door te dringen in de compactere diepere lagen. De lage indringingsweerstand voor deze vegetatie bedraagt immers 15 cm. De resultaten stemmen overeen met de bevindingen van Ampe en Langohr (1993).

In de ontstruweelde panne kan verder een duidelijke afname van de wortels worden waargenomen in de diepere bodemlagen. In de jonge panne blijft de gemiddelde wortelmassa in de diepere bodemlagen nagenoeg constant. Bij de twee meetpunten onder dit vegetatietype wordt echter een andere verticale distributie waargenomen. Het verschil tussen de hoge indringingsweerstand van de bodem bij beide boringen zou dit misschien kunnen verklaren. Bij meetpunt 2 van de jonge panne is de wortelmassa in de bodemlaag van 30 tot 45 cm groter dan in de bodemlaag van 15 tot 30 cm. Bij dit meetpunt werd ook een verdichting in de bodem waargenomen op 35 cm diepte. Bij meetpunt 4 van de jonge panne daarentegen neemt de wortelmassa af in functie van de diepte en treedt compactie in de bodem op bij een diepte van 20 cm. Het is dus mogelijk dat bij meetpunt 2 van de jonge panne de wortels zich dan ook concentreren in de bodem tussen 30 en 35 cm omdat ze de onderliggende bodemlagen niet meer kunnen doordringen.

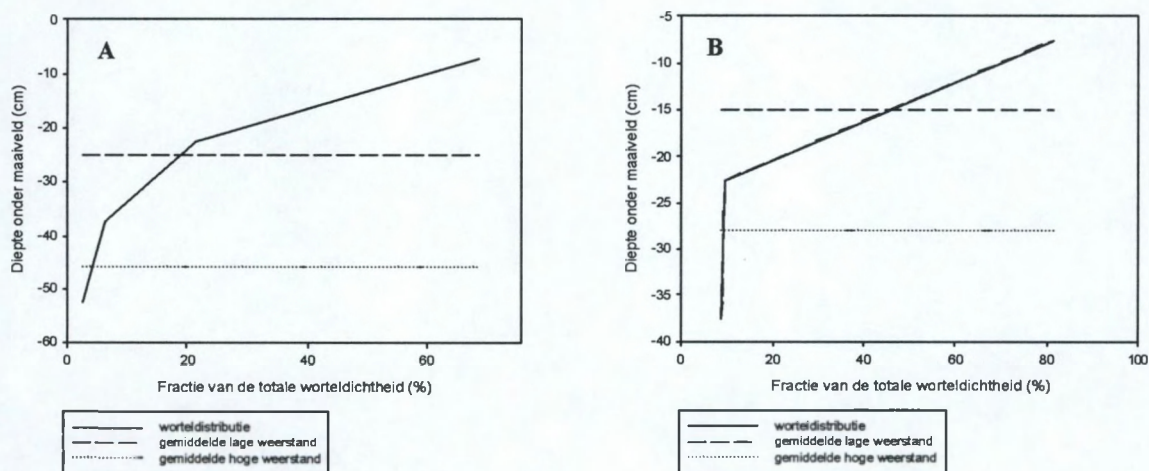
In Figuur 40 wordt een gedetailleerde weergave gegeven van de gemiddelde verticale worteldistributie onder de ontstruweelde panne en onder de jonge panne.



Figuur 40: Gedetailleerde weergave van de gemiddelde verticale worteldistributie onder (A) de ontstruweelde panne en (B) de jonge panne



Uit de gedetailleerde gemiddelde verticale worteldistributie (Figuur 40) kan afgeleid worden dat voor beide onderzochte kruidvegetaties de grootste wortelmassa wordt aangetroffen in de bovenste 5 cm. De wortels zullen zich vermoedelijk in deze bodemlaag concentreren omdat deze laag relatief veel organisch materiaal bevat. In deze A-horizont is de dichtheid lager en het totaal poriënvolume groter dan in de onderliggende bodemlagen (Ampe en Langohr, 1993). De wortels ondervinden er dan ook minder weerstand dan in de onderliggende compactere lagen. Bovendien worden de humusrijkere bovenlagen gekenmerkt door een hoger waterhoudend vermogen. De resultaten uit Figuur 40 bevestigen ook weer de resultaten van de prikboormetingen. De gemiddelde lage weerstand onder de ontstruweelde panne van 25 cm resulteert in een duidelijke afname van de wortelmassa onder deze diepte. Hetzelfde geldt voor de jonge panne met een gemiddelde lage indringingsweerstand van 15 cm. Dit wordt visueel voorgesteld in Figuur 41.

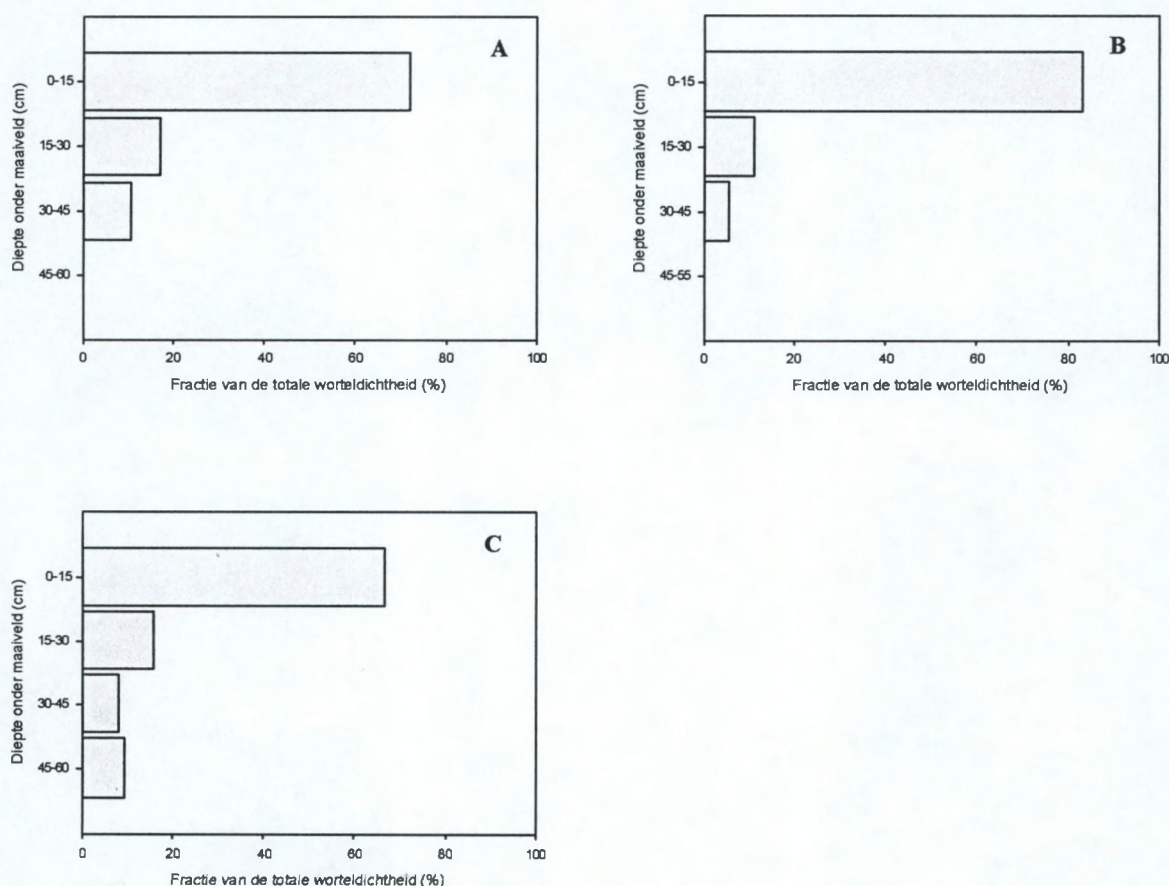


Figuur 41: Relatie tussen de worteldistributie en de gemiddelde lage en hoge indringingsweerstand voor (A) een ontstruweelde panne en (B) een jonge panne

In Figuur 42 wordt de gemiddelde worteldistributie onder een Kruipwilg, een Duindoorn en een Liguster struweel weergegeven.

Net zoals in de kruidvegetaties concentreert meer dan 50 procent van de wortels zich in de bovenste 15 cm van de bodem. In het Kruipwilg struweel bevindt 72 % van de wortels zich in de bovenste 15 cm en 89 % zich in de bovenste 30 cm van de bodem. Deze waarnemingen komen overeen met de prikboormetingen, waarbij de gemiddelde lage weerstand 42 cm is (zie Figuur 44). In het Duindoorn struweel komt 83 % van de wortels voor in de bovenste 15 cm

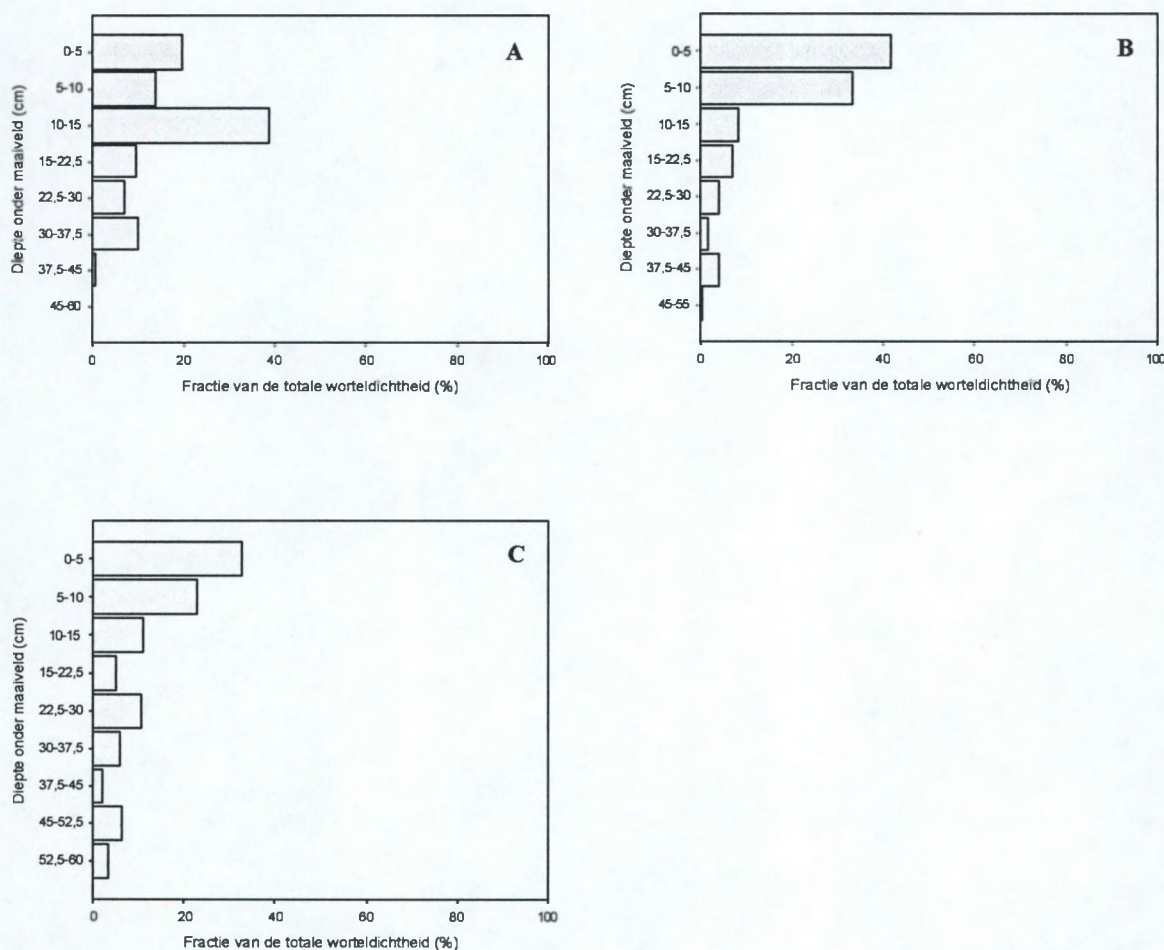
van de bodem en 94 % in de bovenste 30 cm. Ook hier blijkt een goede overeenstemming te zijn met de prikboormetingen. De gemiddelde lage weerstand onder het Duindoorn struweel bedraagt immers 25 cm. Gemiddeld is slechts 6 % van de wortels in staat deze compactere laag te doordringen. In het Liguster struweel bevindt 66 % van de wortels zich in de bovenste 15 cm en 82 % in de bovenste 30 cm. Deze resultaten voor het Liguster struweel kunnen niet worden vergeleken met prikboormetingen omdat er bij deze wortelboringen geen prikboormetingen werden uitgevoerd. Deze resultaten lijken niet volledig in overeenstemming met de bevindingen van Ampe en Langohr (1993). Zij stellen immers dat Duindoorn, in vergelijking met Kruipwilg en Liguster, veel minder horizontale wortels heeft en een belangrijk secundair verticaal wortelstel met weinig vertakkingen heeft. Toch wijzen ook de uitgevoerde wortelboringen onder Duindoorn erop dat de meeste wortels zich in de bovenste bodemlaag bevinden. Anderzijds is het wel zo dat de aanwezigheid van een verticaal wortelstel met weinig vertakkingen minder duidelijk met dergelijke wortelboringen kan worden aangetoond. Er kan immers per toeval net naast de verticale wortel geboord zijn zodat deze niet waargenomen wordt. In die zin kunnen worteluitgravingen een exacter beeld geven.



**Figuur 42: Gemiddelde verticale worteldistributie onder (A) het Kruipwilg, (B) het Duindoorn en (C) Liguster struweel**

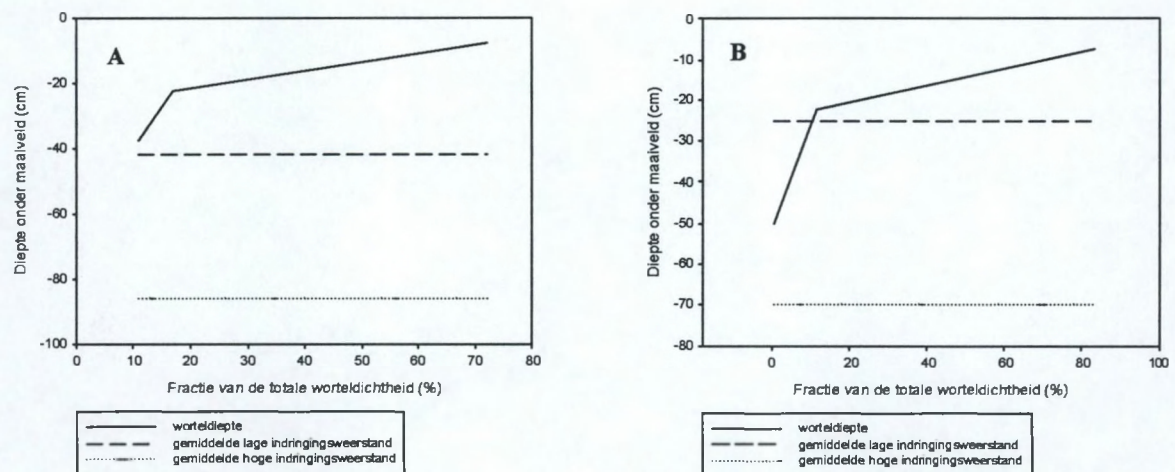


In Figuur 43 wordt een gedetailleerde weergave gegeven van de opgemeten worteldistributie onder een Kruipwilg, Duindoorn en Liguster struweel. Uit Figuur 43 blijkt dat het grootste deel van de wortels onder het Duindoorn en het Liguster struweel voorkomt in de bovenste 5 cm. Bij het Kruipwilg struweel worden de meeste wortels aangetroffen in de zone 10-15 cm.



**Figuur 43: Gedetailleerde weergave van de gemiddelde verticale worteldistributie onder (A) het Kruipwilg, (B) het Duindoorn en (C) het Liguster struweel**

Uit Figuur 44 blijkt dat de gemiddelde lage weerstand onder het Duindoorn en het Kruipwilg struweel resulteert in een duidelijke afname van de wortels.



Figuur 44: Relatie tussen de worteldistributie en de gemiddelde lage en hoge indringingsweerstand voor (A) het Kruipwilg en (B) het Duindoorn struweel

*Uit voorgaand onderzoek naar de verticale worteldistributie bij de kruid- en struikvegetaties kunnen volgende conclusies getrokken worden. Zowel bij de kruidvegetaties als bij de struikvegetaties concentreert meer dan 60 % van de wortels zich in de bovenste 15 cm van de bodem. Verder blijkt dat de gemiddelde lage indringingsweerstand voor beide vegetaties een indicatie geeft over de verticale worteldistributie. De gemiddelde lage indringingsweerstand duidt immers op de zone waaronder een duidelijke afname van de wortels voorkomt.*



#### 4.4. Grondwatertafeldynamiek

##### 4.4.1. Peilbuismetingen

De dataloggers die werden toegewezen aan verschillende (2 of 3) proefvlakken werden om de drie weken naar het ander proefvlak verplaatst. Daardoor waren er ook telkens handmetingen ter beschikking. Na het compenseren van de data met de luchtdrukgegevens en het extra corrigeren aan de hand van één handmeting (zie 3.6.2.) konden de data worden vergeleken met de overige handmetingen. Hierbij viel het op dat in sommige gevallen de fout van de gecorrigeerde data ten opzichte van de handmetingen soms zeer groot was. Meestal was de absolute waarde van deze fout kleiner dan 5 cm. Dikwijls was de fout echter onwaarschijnlijk groot (absolute fout tot 40 cm). Aangezien een dergelijke grote fout in bepaalde periodes naar voor kwam, werden in eerste instantie voor deze loggerdata meerdere correcties met handmetingen uitgevoerd. Er waren immers voldoende handmetingen beschikbaar. In plaats van de hele meetperiode met slechts één handmeting te corrigeren, werd de meetperiode in geval er grote fouten aanwezig waren, opgesplitst en met een beschikbare handmeting uit de respectievelijke periode gecorrigeerd. De verkregen data werden opnieuw vergeleken met de handmetingen. De absolute waarde van het verschil tussen de gecorrigeerde data en de manueel opgemeten waarden van de grondwatertafeldiepte is gemiddeld 4,3 cm. De maximale fout bedraagt 14 cm. Daarom werden de reeds gecorrigeerde data nog een tweede maal gecorrigeerd. Hierbij was het de bedoeling om het kwadratisch verschil tussen de reeds gecorrigeerde data en de overeenkomstige handmetingen te minimaliseren. Op deze manier werd het verschil tussen de gecorrigeerde dataloggerdata en de werkelijk opgemeten grondwatertafeldiepte geminimaliseerd.

Over de oorzaken van de aangetroffen fouten wordt in het duister getast. Er kan echter wel worden gewezen op het feit dat een gemiddelde fout van 4,3 cm groot is en de resolutie van de meetnauwkeurigheid van de dataloggers (1 cm) overtreft. Dergelijke grote fouten werden ook aangetroffen in andere onderzoeken uitgevoerd in het Instituut voor Natuurbehoud (Provoost, mondelinge mededeling)

##### 4.4.2. Seizoensale grondwatertafeldynamiek

In eerste instantie werden de grondwatertafeldata uitgezet in functie van de tijd. Hierbij kon duidelijk een seizoenaal verloop waargenomen worden. Figuren die het verloop van de

grondwatertafel in functie van de tijd weergegeven, worden getoond en besproken in paragraaf 4.4.3..

#### 4.4.3. Relatie tussen de grondwatertafeldiepte en de worteldiepte

Uit het wortelonderzoek (zie paragraaf 4.3.2.) kon worden afgeleid hoe diep de beworteling onder de verschillende vegetaties kan zijn. Door deze gegevens te relateren aan de diepte van de grondwatertafel kon worden afgeleid of er eventueel droogtestress opgetreden is in bepaalde periodes.

Dit werd nagegaan door van elk proefvlak de diepst mogelijke worteldiepte die werd gevonden in het wortelonderzoek voor de verschillende vegetatietypen te relateren aan de grondwatertafeldiepte. Voor de proefvlakken in de kruidvegetaties werd verondersteld dat de planten in de jonge pannes en de pionierspannes wortelen tot een diepte van 45 cm (bewortelingsdiepte voor een jonge panne). Voor de planten in een ontstruweelde panne en de niet begraasde en gemaaide panne werd een bewortelingsdiepte van 60 cm genomen (bewortelingsdiepte van een ontstruweelde panne). In het gemengd struweel werd de maximale worteldiepte op 60 cm genomen, in het Kruipwilg struweel op 45 cm en in het Duindoorn struweel op 55 cm.

Volgens Ampe en Langohr (1993) bedraagt de capillaire stijghoogte in de duinbodems van de Westhoek ongeveer 40 cm. Aan de hand van deze gegevens kon nagegaan worden of er al dan niet droogtestress opgetreden is in de verschillende proefvlakken gedurende het groeiseizoen.

Voor de verschillende kruidproefvlakken wordt de seizoenale dynamiek van de grondwatertafel en de hiermee overeenkomende capillaire opstijgingshoogte vergeleken met de bewortelingsdiepte (Figuur 45). In deze figuur wordt telkens de diepte van de grondwatertafel gegeven. Daarbij wordt ook aangeduid hoe hoog het waterfront (= grondwatertafel + capillaire opstijgingshoogte) zich bevindt, steunende op een capillaire stijghoogte van 40 cm. Hierbij is het uiteraard zo dat, indien de grondwatertafel zich op minder dan 40 cm onder het maaiveld bevindt, in de praktijk het waterfront samenvalt met het maaiveld. Omwille van een meer eenvoudige visuele voorstelling wordt hiermee geen rekening gehouden in de figuren. De bewortelingsdiepte evenals de lage indringingsweerstand worden eveneens weergegeven. De lage indringingsweerstand wordt aangeduid omdat uit het wortelonderzoek (zie 4.3.2.) is gebleken dat er een relatie bestaat tussen deze lage indringingsweerstand en de hoeveelheid wortels. Uit het wortelonderzoek kon namelijk geconcludeerd worden dat de lage indringingsweerstand de diepte aanduidt waarboven de meeste wortels zich bevinden.

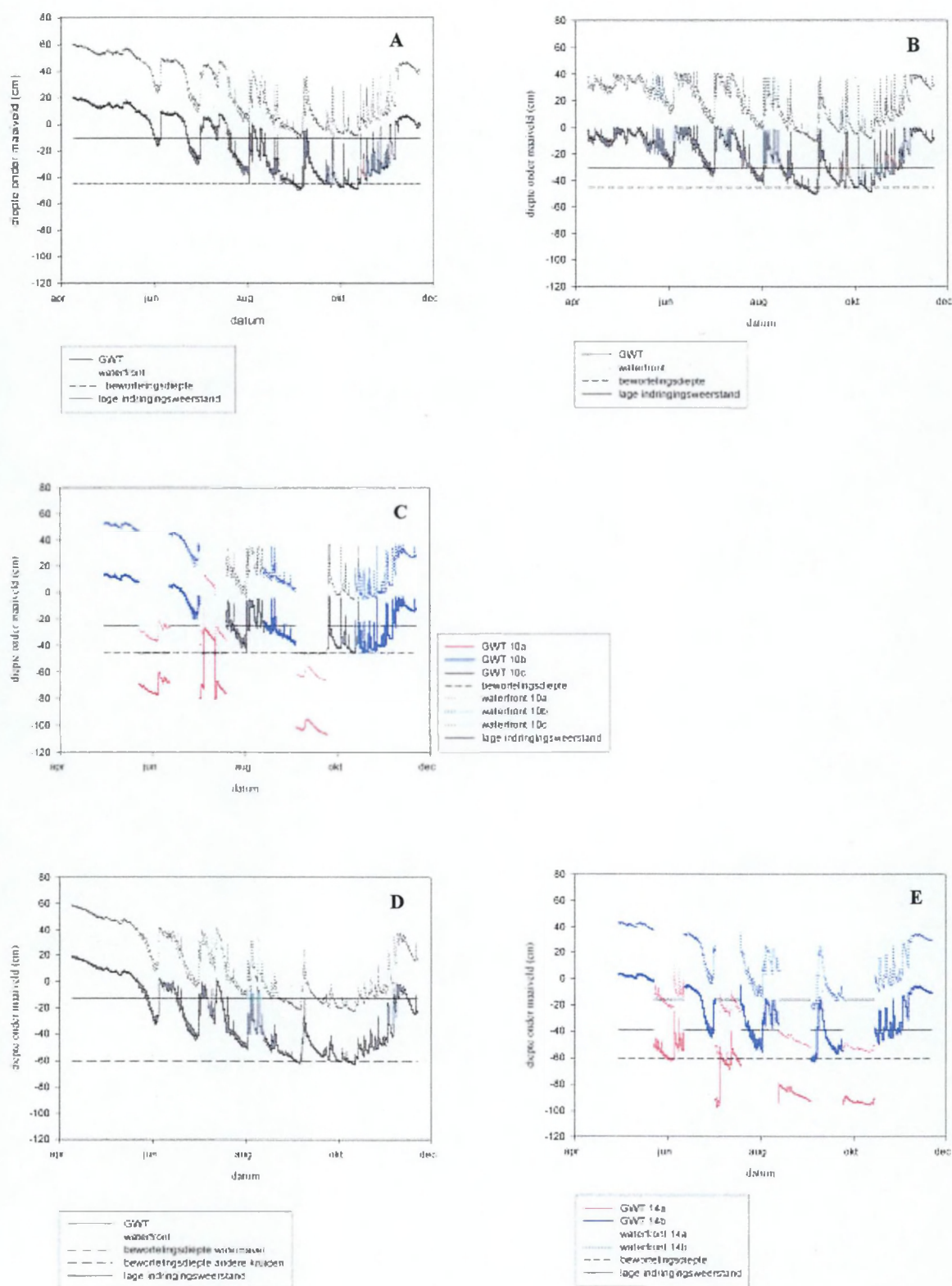
Voor de proefvlakken 2, 3, 4, 10b, 10c en 14b (Figuur 45a, b, d, c en e) stemt de maximale bewortelingsdiepte overeen met de minimale opgemeten grondwaterstand. Rekening gehouden met deze bewortelingsdiepte, is er dus hoogstwaarschijnlijk geen droogtestress



opgetreden in deze proefvlakken. Indien rekening wordt gehouden met de lage indringingsweerstand van de verschillende proefvlakken, dan kan men zien dat er wellicht geen droogtestress opgetreden is in de proefvlakken 2, 3, 10b, 10c en 14b. In proefvlak 4 (Figuur 45d) wijst de lage indringingsweerstand op een eventueel tijdelijk watertekort vanaf de tweede helft van augustus tot begin september en vanaf de tweede helft van september tot eind oktober. In proefvlak 14a (Figuur 45e) komt de minimale grondwaterstand voor op ongeveer 95 cm diepte. Aangezien de planten er tot 60 cm diepte wortelen (waarde ontstruweelde panne), konden ze wellicht gedurende het ganse groeiseizoen via capillaire opstijging van het water over voldoende water beschikken. Indien echter rekening wordt gehouden met de lage indringingsweerstand als bewortelingsdiepte, dan treedt er slechts enkele keren een tijdelijk watertekort op, eind mei en tijdens de maand juli. Er kan ook in andere periodes een tijdelijk watertekort zijn opgetreden in dit proefvlak, maar gegevens hierover ontbreken. In proefvlak 10a (Figuur 45c) bedraagt de minimale opgemeten grondwaterstand 110 cm onder het maaiveld. De bewortelingsdiepte wordt verondersteld 45 cm te zijn. Hierdoor bereikte het waterfront niet meer de diepste wortels in de periode van september tot oktober. Ook in andere periodes kan er droogtestress zijn opgetreden, maar hierover zijn geen gegevens beschikbaar. De lage indringingsweerstand in proefvlak 10a komt ongeveer overeen met de maximale bewortelingsdiepte zodat dit ook hier weer kan wijzen op een tijdelijk watertekort in de periode van september tot oktober.

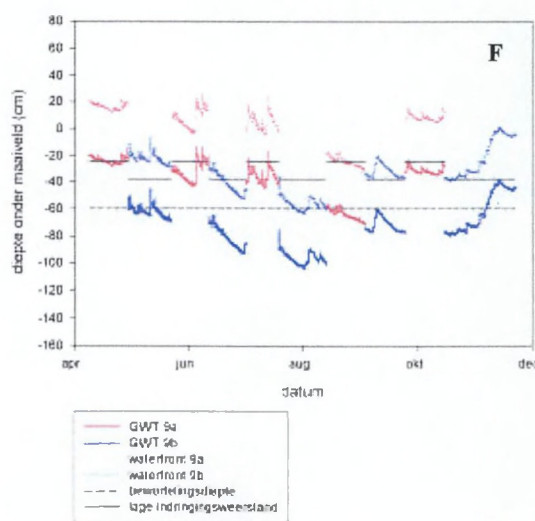
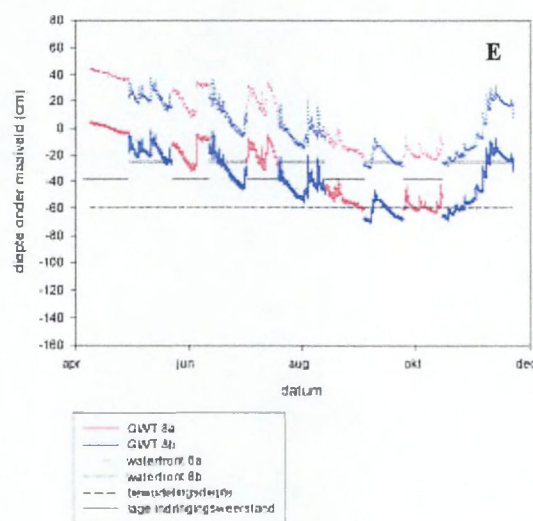
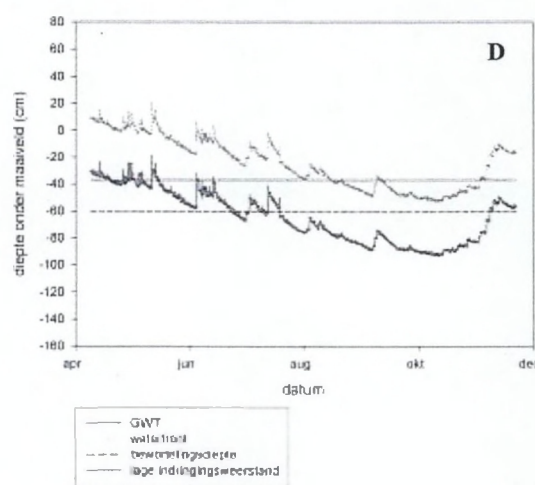
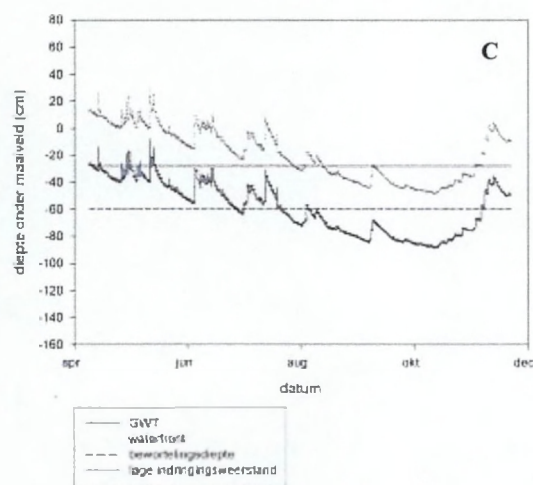
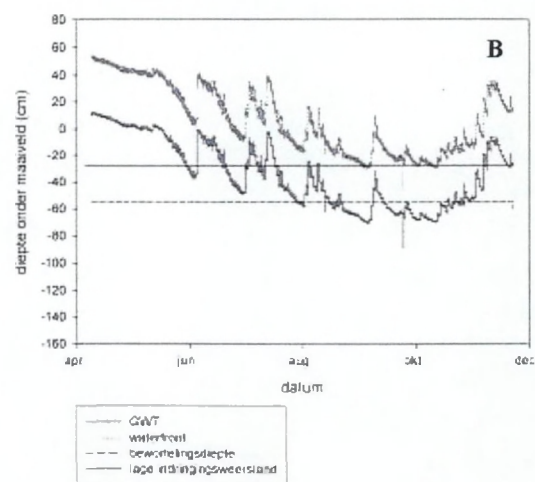
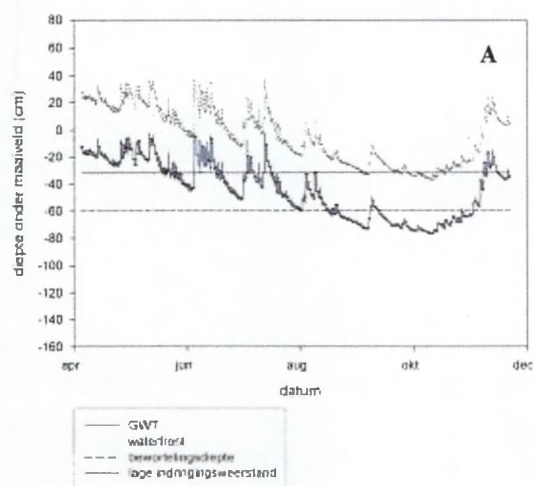
Deze gegevens over de tijdelijke watertekorten werden gerelateerd aan de porometerdata opgemeten in de betreffende proefvlakken. Er werd echter geen invloed waargenomen van een eventueel tijdelijk watertekort op de stomatale weerstanden.

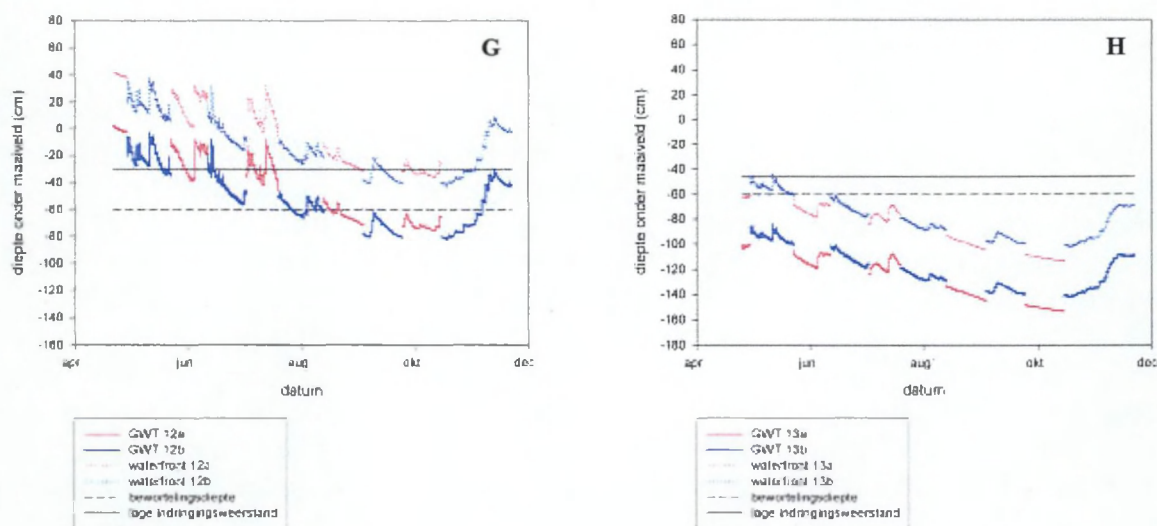
Dezelfde analyse werd gevoerd voor de struikvegetaties. De grondwatertafeldynamiek en het verband met de worteldiepte voor de verschillende onderzochte proefvlakken wordt weergegeven in Figuur 46.



Figuur 45: Relatie tussen de grondwatertafeldiepte, het waterfront en de worteldiepte voor de kruidvegetaties. Met A = proefvlak 2, B = proefvlak 3, C = proefvlak 10a, 10b en 10c, D = proefvlak 4 en E = proefvlak 14a en 14b







**Figuur 46:** Relatie tussen de grondwatertafeldiepte, het waterfront en de worteldiepte voor de struikvegetaties. Met A = proefvlak 1, B = proefvlak 5, C = proefvlak 6, D = proefvlak 7, E = proefvlak 8a en 8b, F = proefvlak 9a en 9b, G = proefvlak 12a en 12b en H = proefvlak 13a en 13b

In tegenstelling tot wat het geval was voor bijna alle kruidvegetaties stemt bij de struikvegetaties de maximale bewortelingsdiepte minder overeen met de minimale opgemeten grondwaterstand. Dit is wel nog het geval voor de proefvlakken 8a, 8b en 9a (zie Figuur 46e en f). Er kan hierbij wel worden opgemerkt dat bepaalde struiken misschien wel dieper wortelen, maar dat dit bij de wortelboringen niet werd waargenomen. Mogelijk kunnen meer herhalingen bij de wortelboringen of worteluitgravingen een beter beeld hiervan bieden.

Rekening houdend met de maximale bewortelingsdiepte is er wellicht geen watertekort opgetreden in de proefvlakken 1, 5, 6, 7, 8a, 8b, 9a, 12a en 12b (zie respectievelijk Figuur 46a, b, c, d, e, f en g). In proefvlak 9b (zie Figuur 46f) zijn er eventueel enkele zeer kortstondige watertekorten geweest begin augustus. In de proefvlakken 13a en 13b (zie Figuur 46h) is wellicht een grondwatertekort opgetreden vanaf het einde van mei, indien hierbij rekening wordt gehouden met de maximale bewortelingsdiepte.

Uit het wortelonderzoek is gebleken dat de lage indringingsweerstand een indicatie kan geven waar de meeste wortels zich in de bodem bevinden. Deze lage indringingsweerstand kan ook hier informatie opleveren over eventuele grondwatertekorten bij de kruidachtige planten onder de struiken. Indien rekening gehouden wordt met de lage indringingsweerstand dan is er wellicht geen grondwatertekort opgetreden in de proefvlakken 1, 5 en 8a (zie Figuur 46a, b en e). In het proefvlak 8b (zie Figuur 46e) is er eventueel een kortstondig grondwatertekort opgetreden tijdens de maanden september en oktober. In de proefvlakken 6, 7, 9a, 9b, 12a en



12b (zie Figuur 46c, d, f en g) zijn er gedurende voornamelijk de tweede helft van het groeiseizoen waarschijnlijk grondwatertekorten geweest voor de planten. Rekening gehouden met de lage indringingsweerstand kan er in de proefvlakken 13a en 13b (zie Figuur 46h) gedurende het ganse groeiseizoen droogtestress geweest zijn. Wellicht is deze laatste conclusie niet volledig correct. Een mogelijke verklaring is dat de planten toch dieper wortelen op de plaatsen waar de grondwatertafel dieper zit. Dit kan echter nog niet verklaren dat de kruidachtige planten op dergelijke standplaatsen kunnen overleven. Water kan echter ook in de bodem circuleren onder de vorm van waterdamp. Door de afkoeling gedurende de nacht kan de waterdamp, die diffundeert uit de lagere warmere bodemlagen, 's nachts in de bovenste horizonten condenseren (thermocondensatie) (Larcher, 2001). Een andere manier waarop water verticaal kan worden verplaatst in droge situaties is de zogenaamde *hydraulic lift*. Gedurende de nacht kan het water, dat door de struikwortels werd meegenomen uit de diepere vochtige bodemhorizonten, terug worden vrijgegeven aan de bovenste droge horizonten. Deze afgifte van water aan de bodem kan verklaard worden door een lagere waterpotentiaal van de omringende bodem dan van de wortels die het water vervoeren. Het vrijgegeven water kan dan gedurende de volgende dag opgenomen worden door minder diep wortelende planten, zoals de kruidvegetatie. Op die manier helpen de dieper wortelende planten de naburige planten met minder diepe wortels aan water op plaatsen waar de grondwatertafel diep onder het maaiveld zit. Dit fenomeen werd onder andere reeds waargenomen in Savanne ecosystemen (Scholz *et al.*, 2002). Daarnaast is het uiteraard ook zo dat de minder diep wortelende planten gebruik kunnen maken van de vochttoevoer uit neerslag.

Niettegenstaande de opmerkingen die werden gemaakt bij de conclusies over het optreden van eventuele grondwatertekorten werd toch nagegaan of de eventuele grondwatertekorten konden worden opgemerkt in de opgemeten stomatale weerstanden van planten in dergelijke proefvlakken. Er kon echter geen verband gevonden worden tussen de het eventueel optreden van droogtestress en de stomatale weerstand.

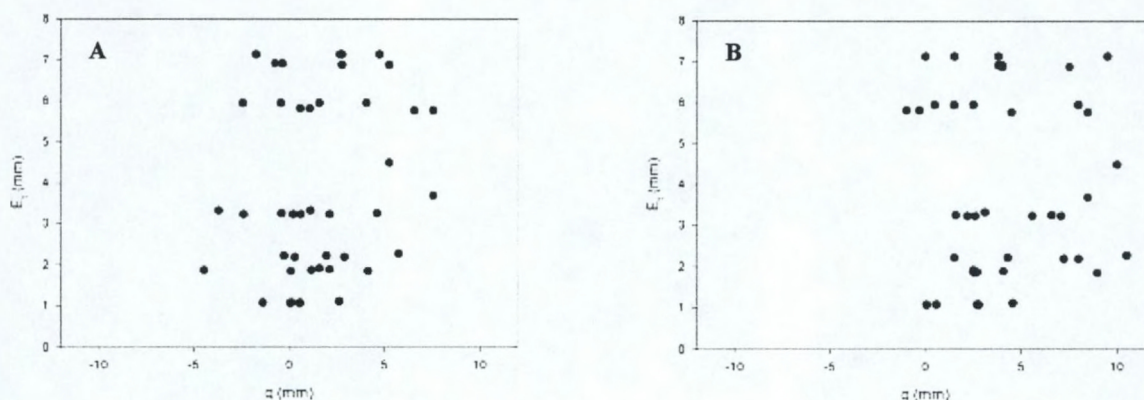
#### 4.4.4. Diurnale grondwatertafeldynamiek en relatie met de FORUG-resultaten

Om uit de diurnale grondwatertafeldynamiek conclusies te kunnen trekken naar de grootte van de evapotranspiratie moesten eerst de zones worden geslecteerd waarbij zeker geen verstoring kon zijn van de grondwatertafel door de neerslag. Hiertoe werden de neerslaggegevens van het KMI (opgemeten in Koksijde) gebruikt. Het blijkt (zie paragraaf 3.6.5.) dat er gedurende het ganse groeiseizoen slechts enkele kortstondige periodes zijn, waarbij kan worden verondersteld dat de grondwatertafel niet werd beïnvloed door een *input* aan regen. Er zijn immers slechts 49 eventueel bruikbare dagen over, waarbij slechts een gering aantal dagen deel uitmaakt van een aaneengesloten droge periode. Om deze reden was

het slechts zinvol voor de periode van 15 augustus tot en met 17 augustus de evapotranspiratiewaarden uit de grondwatertafeldata en uit het FORUG-model voor alle proefvlakken samen te vergelijken. De voorgaande dag aan deze periode waarop neerslag viel, was 12 augustus. Op deze dag viel er 5,1 mm regen.

De evapotranspiratie werd uit de grondwatertafeldynamiek berekend aan de hand van formule 3.32. Hierbij werd de uurlijkse snelheid van de grondwaterinstroom ( $r$ ) berekend als de stijging van de grondwatertafel tussen enerzijds middernacht en 4 uur en anderzijds tussen 2 en 6 uur.

In Figuur 47 wordt een vergelijking gegeven tussen de berekende evapotranspiratie uit de grondwatertafeldynamiek en de FORUG-resultaten.



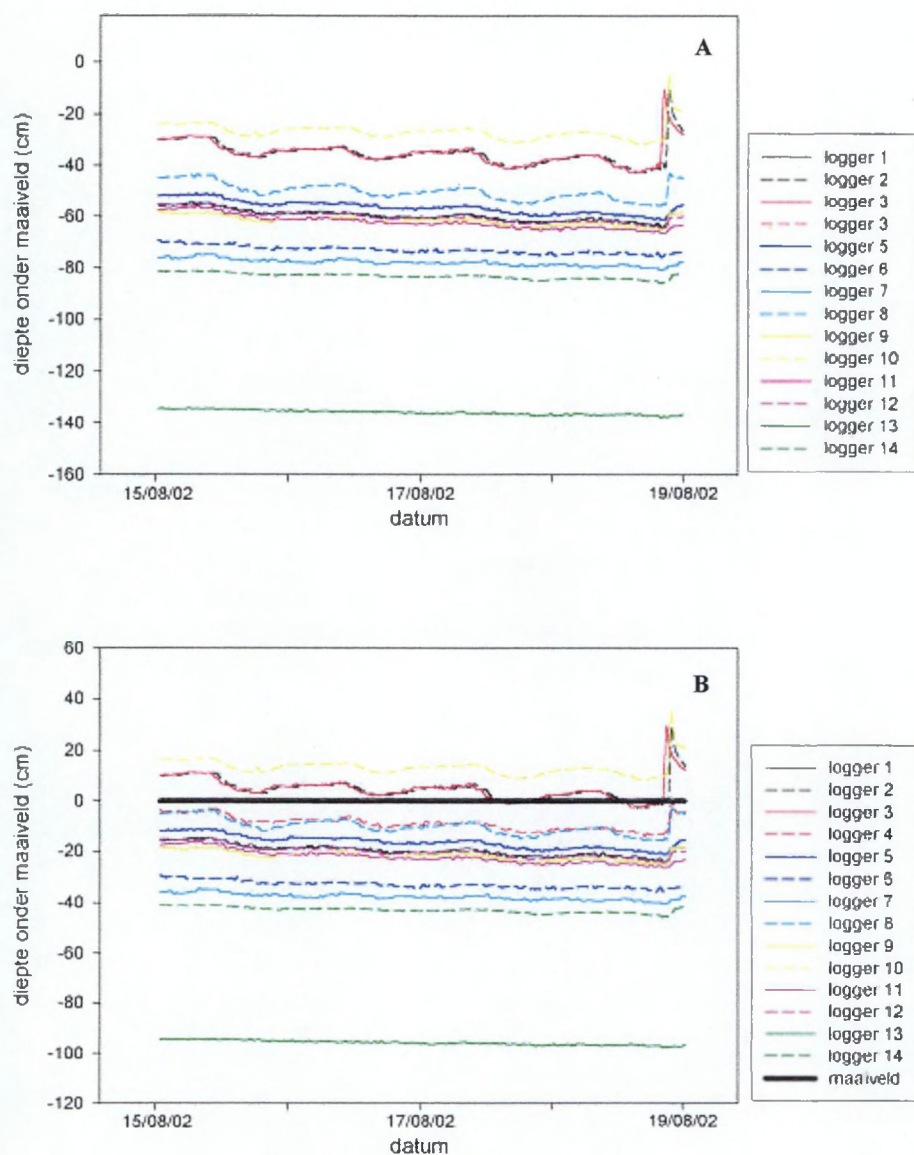
**Figuur 47:** Vergelijking tussen de berekening van de evapotranspiratie uit de grondwatertafeldynamiek ( $q$ ) en de FORUG-resultaten ( $E_t$ ) voor de periode van 15-08-02 tot en met 17-08-02. Met A = berekeningen van  $q$  gebaseerd op de uurlijkse stijging van de grondwatertafel tussen middernacht en 4 uur, en B = berekeningen van  $q$  gebaseerd op de uurlijkse stijging van de grondwatertafel tussen 2 en 6 uur.

Uit Figuur 47 blijkt dat de berekeningen van de evapotranspiratie op basis van de grondwatertafeldynamiek betere resultaten opleveren indien de uurlijkse stijging van de grondwatertafel genomen wordt tussen 2 en 6 uur. Er worden immers minder negatieve waarden voor  $q$  gegenereerd. Verder blijkt echter wel dat geen correlatie bestaat tussen de evapotranspiratiewaarden berekend uit de grondwatertafeldynamiek en de FORUG-resultaten. Uit Figuur 47 kan ook afgeleid worden dat de beide berekeningen van de evapotranspiratie wel waarden van dezelfde grootte-orde opleveren.

De vraag kan gesteld worden of het wel evident is om de evapotranspiratie te berekenen aan de hand van de grondwatertafeldynamiek. Uit de studie van de relatie tussen de

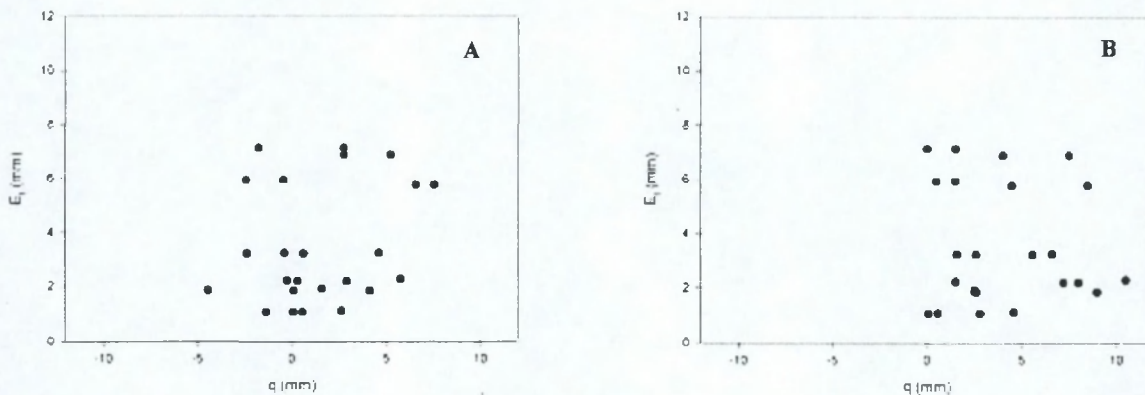


grondwatertafeldiepte en de worteldiepte is immers gebleken dat er voor bepaalde struikvegetaties gedurende een groot deel van het groeiseizoen een watertekort zou opgetreden zijn. Enkele mogelijke verklaringen, die werden gegeven voor het feit dat de planten (voornamelijk de minder diep wortelende planten) toch kunnen overleven, wijzen op een aantal mechanismen waarbij de grondwatertafel niet rechtstreeks wordt aangesproken om in de watervoorziening van de plant te voorzien (zie paragraaf 4.3.2.). De diurnale grondwatertafeldynamiek was ook niet in alle proefvlakken even duidelijk aanwezig. Dit wordt weergegeven voor de periode van 15/08/02 tot en met 18/08/02 in Figuur 48. Uit deze figuur kan afgeleid worden dat de diurnale dynamiek afneemt bij een dieper liggende grondwatertafel. Dit zou erop kunnen wijzen dat de evapotranspiratie slechts kan voorspeld worden uit de grondwatertafeldata indien de wortels voorkomen in de buurt van de grondwatertafel. In deze laatste gevallen kan dan ook verondersteld worden dat de berekende evapotranspiratie uit de grondwatertafeldata beter kan worden vergeleken met de FORUG-resultaten. Dit wordt weergegeven in Figuur 49, waarbij de evapotranspiratie enkel berekend werd voor de proefvlakken 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9a en 10b.



Figuur 48: Vergelijking van A) de grondwatertafeldiepte tussen de verschillende proefvlakken en B) het waterfront tussen de verschillende proefvlakken voor de periode van 15/08/02 tot en met 18/08/02





Figuur 49: Vergelijking tussen de berekening van de evapotranspiratie uit de grondwatertafeldynamiek ( $q$ ) en de FORUG-resultaten ( $E_t$ ) voor de periode van 15-08-02 tot en met 17-08-02 en voor de proefvlakken met een duidelijke grondwatertafeldynamiek. Met  $q$  gebaseerd op de uurlijkse stijging van de grondwatertafel tussen (A) middernacht en 4 uur en (B) 2 en 6 uur

Uit Figuur 49 kan worden besloten dat er nog steeds geen duidelijke correlatie te vinden is tussen de evapotranspiratie berekend aan de hand van de grondwatertafeldynamiek en de FORUG-resultaten in de proefvlakken waar er een duidelijke diurnale grondwatertafeldynamiek is. Ook hier kan wel een kleine verbetering worden waargenomen indien de uurlijkse grondwatertafelstijging wordt afgeleid uit de periode van 2 tot 6 uur. Uit deze laatste berekening kan ook worden afgeleid dat, ondanks het feit dat er geen correlatie te vinden is tussen de evapotranspiratiewaarden op beide wijzen berekend, er toch overeenkomst is wat betreft de grootte-orde van de berekende waarden.

*Uit dit onderzoek naar het verband tussen de dagelijkse grondwatertafelfluctuaties en de grootte van de evapotranspiratie kunnen een aantal zaken worden besloten. Ten eerste was het in het kader van dit project, waarbij in hoofdzaak aandacht werd besteed aan het plantenfysiologische luik van de evapotranspiratie, onmogelijk om de relatie tussen de grondwatertafel en de evapotranspiratie uitvoerig te onderzoeken. Daarenboven zijn er bij ons weten in de literatuur weinig referenties verschenen die de theorie van Meyboom (1967) lijken te bevestigen. In het hier gevoerde onderzoek werd geen verband gevonden tussen de grondwatertafeldynamiek en de evapotranspiratie berekend aan de hand van het FORUG-model. De op beide wijzen berekende evapotranspiratiewaarden leverden wel waarden op van dezelfde grootte-orde.*

## **5. Besluit en aanwijzingen voor verder onderzoek**

De hoofddoelstelling van het onderzoek was het kwantitatief inschatten van de evapotranspiratie van verschillende representatieve vegetatietypes (kruid- en struikachtige vegetaties) van vochtige duinvalleien. Hierdoor moeten de effecten van een ontstruweling in dergelijke ecosystemen op de grondwatertafel kunnen worden ingeschat.

Deze hoofddoelstelling werd opgesplitst in drie subdoelstellingen. (i) De verdampingskarakteristieken van de verschillende vegetatietypen moesten ecofysiologisch worden onderzocht. (ii) De grondwatertafeldynamiek onder de verschillende vegetaties moest bestudeerd worden. (iii) Er moest een integratie worden gemaakt van de verdampings- en de hydrologische studies.

Om deze vraagstellingen te kunnen beantwoorden, werd het onderzoek opgedeeld in een aantal deelstudies. Deze verschillende onderdelen werden eerst afzonderlijk behandeld. Daarna werden de resultaten uit de verschillende deelstudies met elkaar in verband gebracht.

In eerste en voornaamste instantie werden de verdampingskarakteristieken van de onderscheiden vegetatietypen bestudeerd op ecofysiologisch niveau aan de hand van geselecteerde representatieve plantensoorten en van metingen op vegetatieniveau.

De hiervoor verzamelde velddata werden in een tweede fase gebruikt om voorspellingen te doen van de evapotranspiratie op basis van het FORUG-model.

Een derde luik van het onderzoek betrof een bodemonderzoek. Om eventuele verschillen in evapotranspiratie te onderscheiden tussen de verschillende vegetatietypes kan de kennis over de beworteling van de verschillende planten immers een belangrijke bijdrage leveren. Om deze reden werden een aantal bodemparameters onderzocht: de indringingsweerstand, de bewortelingsdiepte en de verticale distributie van de wortels.

In een vierde deel van het onderzoek werd de grondwatertafeldynamiek onder de verschillende vegetatietypes bestudeerd. Deze gegevens konden worden gerelateerd aan de resultaten uit de voorgaande delen van het onderzoek. In eerste instantie werd hierbij de bewortelingsdiepte en de verticale worteldistributie gerelateerd aan de diepte van de grondwatertafel. Vervolgens werden de berekende evapotranspiratiewaarden uit de diurnale grondwatertafeldynamiek vergeleken met de modelresultaten.

De voornaamste conclusies die uit de waarnemingen konden worden afgeleid, zijn de volgende.



- Uit het uitgebreid aantal porometermetingen kon geen duidelijk verschil worden waargenomen tussen de dynamiek en de grootte van de stomatale weerstanden, opgemeten bij de verschillende geselecteerde kruiden en struiken.
- Bij het opstellen van een stomataal weerstandsmodel werd geen enkel model gevonden die een zeer hoge  $r^2$  waarde opleverde. Het opsplitsen van de totale kruid- en struikdataset in tijdsperiodes (lente, zomer en herfst) leverde geen wezenlijke verbeteringen op. Toch werden deze modellen voor de verschillende tijdsperiodes weerhouden om de evapotranspiratie te simuleren met behulp van het FORUG model, aangezien immers de waarnemingen een seizoenaal verloop van de stomatale weerstand laten vermoeden.
- Uit de LAI-bepalingen is gebleken dat de LAI van een struikvegetatie over het algemeen groter is dan deze van de kruidvegetaties. De LAI van het jong Duindoorn struweel ligt echter wel in dezelfde grootte-orde als deze van de kruidvegetaties.
- Algemeen kan worden gesteld dat de verdamping van de kruidvegetaties in de duinen duidelijk minder is dan deze van de struikvegetaties. Verklaringen hiervoor kunnen hoofdzakelijk gevonden worden in hogere LAI-waarden, een grotere ruwheid en een grotere interceptiecapaciteit van de struikvegetaties.
- Uit het onderzoek van de maximale bewortelingsdiepte bij kruid- en struikvegetaties kan er geen duidelijk verschil gevonden worden tussen de verschillende vegetaties.
- Uit het onderzoek naar de verticale worteldistributie bij de kruid- en struikvegetaties blijkt dat zowel bij de kruidvegetaties als bij de struikvegetaties meer dan 60 % van de wortels zich concentreert in de bovenste 15 cm van de bodem. Verder blijkt dat de gemiddelde lage indringingsweerstand voor beide vegetaties een goede indicatie geeft voor de verticale worteldistributie. De gemiddelde lage indringingsweerstand komt immers overeen met de zone waaronder een duidelijke afname van de wortels wordt waargenomen.
- Het voorkomen van eventuele tijdelijke grondwatertekorten, berekend aan de hand van de grondwatertafeldiepte, de capillaire opstijgingshoogte en de bewortelingsdiepte, kon niet in verband worden gebracht met een stressgedrag van het stomataal apparaat, meer bepaald een toename van de stomatale weerstand.
- Uit het onderzoek naar het verband tussen de dagelijkse grondwatertafelfluctuaties en de grootte van de evapotranspiratie berekend uit deze dynamiek en aan de hand van het FORUG-model, kunnen eveneens een aantal zaken worden besloten. Ten eerste was het in het kader van dit project, waarbij in hoofdzaak aandacht werd besteed aan het



plantenfysiologische luik van de evapotranspiratie, onmogelijk om de relatie tussen de grondwatertafel en de evapotranspiratie uitvoerig te onderzoeken. In het hier gevoerde onderzoek werd geen verband gevonden tussen de evapotranspiratie berekend uit de grondwatertafeldynamiek en de evapotranspiratie berekend aan de hand van het FORUG-model. De op beide wijzen berekende evapotranspiratiewaarden leverden echter wel waarden op van dezelfde grootte-orde.

De hoofdvraagstelling van het gevoerde onderzoek, namelijk de kwantitatieve inschatting van de evapotranspiratie in kruidachtige en struikachtige vegetaties in vochtige duinvalleien, kan op basis van de opgedane kennis als volgt beantwoord worden.

De evapotranspiratie van een 'gemiddelde' kruidvegetatie in de vochtige duinvalleien van het natuurreserveaat de Westhoek werd voor de periode van 2 april 2002 tot en met 31 oktober 2002 ingeschat als 165 mm. Indien hierbij ook rekening wordt gehouden met de interceptieverdamping bedroeg de evapotranspiratie voor dezelfde periode ongeveer 200 mm. Voor een 'gemiddelde' struikvegetatie in deze vochtige duinvalleien werd een evapotranspiratie berekend van 435 mm voor dezelfde periode als voor de kruidvegetaties. Rekening houdend met de interceptieverdamping bedroeg de evapotranspiratie ongeveer 555 mm. Hieruit blijkt een beduidend grotere evapotranspiratie voor de 'gemiddelde' struikvegetatie ten opzichte van de 'gemiddelde' kruidvegetatie.

Bij de opsplitsing van de 'gemiddelde' kruidvegetatie in drie types (ontstruweelde panne, jonge panne en pionierspanne) is gebleken dat de totale berekende evapotranspiratie voor de in acht genomen periode niet veel van elkaar verschilt. De totale evapotranspiratie voor de ontstruweelde panne, de jonge panne en de pionierspanne werd respectievelijk ingeschat als ongeveer 160 mm, 160 mm en 170 mm. Rekening houdend met de interceptieverdamping wordt dit respectievelijk ongeveer 190 mm, 205 mm en 210 mm. De 'gemiddelde' struikvegetatie werd ook opgesplitst in een aantal typevegetaties: Kruiwilg-Duindoorn struweel, Liguster struweel, gemengd struweel en jong Duindoorn struweel. De evapotranspiratie voor deze struikvegetatietypes voor de in acht genomen periode bedroeg respectievelijk ongeveer 465 mm, 480 mm, 460 mm en 270 mm. Rekening gehouden met de interceptieverdamping werden respectievelijk ongeveer volgende waarden berekend, 590 mm, 605 mm, 580 mm en 370 mm.

Om hieruit een eenduidig antwoord te formuleren naar de beheersmaatregelen, namelijk het ontstruwelen van de vochtige duinvalleien, is minder evident. De evapotranspiratie van struiken is beduidend hoger dan van kruiden. Hieruit zou kunnen worden afgeleid dat een ontstruweling gepaard gaat met een verhoging van de grondwatertafel en dus een vernatting van het ecosysteem. Het is echter ook zo dat struiken de infiltratie van regenwater in de bodem kunnen vergemakkelijken doordat de bodemcondities verbeterd worden. Daarnaast kunnen de wortels van struiken de percolatie verbeteren doordat er macroporiën gevormd worden (Le Maitre *et al.*, 1999). Deze invloeden op de penetratie van regenwater zijn echter



moeilijk in te schatten. Indien daarom met deze opmerking van Le Maitre *et al.* (1999) geen rekening wordt gehouden, kan een vernatting van het ecosysteem verwacht worden bij een ontstruweling van een Kruipwilg-Duindoorn, een Liguster en een gemengd struweel. Het kappen van het jonge Duindoorn struweel zal zeer waarschijnlijk geen grote invloed hebben op de grondwatertafel.

Tijdens het onderzoek is gebleken dat een antwoord formuleren op de bovenvermelde vraagstelling zeer complex is. Er zijn immers veel factoren die een rol spelen in de totale evapotranspiratie van ecosystemen. Hoewel er zeer veel experimenteel en mathematisch werk verricht is voor dit onderzoek, was het onmogelijk om in het beperkte tijds kader alle invloedsfactoren na te gaan. Verder en diepgaander onderzoek in dit onderwerp zou dan ook zeer interessant en wenselijk kunnen zijn.

Porometermetingen zijn immers slechts één methode om een idee te krijgen over de transpiratie van planten. Sapstroommetingen zouden een goede aanvulling kunnen geven op de porometermetingen omdat zij toelaten verschillende bladeren terzelfdertijd te bemonsteren. Het nadeel van dergelijke metingen is dat er weliswaar enkel metingen kunnen worden gedaan op struiken omdat er houtige stammen of takken vereist zijn. Een nadeel van de porometermetingen is bovendien dat de omstandigheden waarin de metingen gebeuren niet kunnen worden gecontroleerd. Het meten van de gasuitwisseling tussen plant en atmosfeer met een gasanalysator biedt eventueel een meerwaarde ten opzichte van de voor dit onderzoek gevoerde porometermetingen. Bij dergelijke metingen kan men immers een gewenst microklimaat aan de bemonsterde bladeren opleggen, zodat de relatie tussen de stomatale geleidbaarheid en meteorologische variabelen gemakkelijker kan worden onderzocht.

Naast het opmeten van de grondwatertafeldynamiek zou het eveneens interessant kunnen zijn om de bodemvochtbeschikbaarheid op te volgen. Op die manier kan rechtstreeks worden nagegaan of er al dan niet bodemwaterstress optreedt voor de planten. Bovendien zou de kennis van deze parameter ook een meerwaarde kunnen zijn bij het modelleren van de stomatale weerstand.

Naast deze aanpassingen van het veldwerk, kunnen ook nog aanpassingen gebeuren aan het FORUG-model. Uit de resultaten is immers gebleken dat de waarden voor de bodemevaporatie eerder aan de lage kant zijn. In de toekomst wordt aan dit luik van het model verder gewerkt. Het zou daarenboven een meerwaarde kunnen betekenen voor de interpretatie van de FORUG-modelresultaten, indien de meteorologische variabelen in de vochtige duinvalleien zelf zouden worden opgemeten.

Een laatste opmerking kan nog worden gemaakt omtrent de berekening van de evapotranspiratie uit de grondwatertafeldynamiek. Alhoewel deze methode interessante perspectieven zou kunnen bieden, is er weinig informatie hieromtrent in de literatuur te vinden. Betrouwbare langetermijn schattingen van zowel evapotranspiratie als van de



grondwatertafeldynamiek zouden toelaten deze mogelijks interessante methode uitvoeriger te testen.



## 6. Literatuurlijst

- Ampe, C., 1999.** Onderzoek van duinbodems langsheen de Vlaamse en Noord-Franse kust met bijzondere aandacht voor de ecosysteemdynamiek en natuurbeheer. Gent, Universiteit Gent.
- Ampe, C. and Langohr, R., 1993.** Distribution and dynamics of shrub roots in recent coastal dune valley ecosystems of Belgium. *Geoderma*, 56: 37-55.
- Baes, R. 1989.** Natuurontwikkelingsplan voor de Belgische kust – eerste fase: onderzoek naar beheersrelevante milieufactoren in enkele sleutelgebieden. Partim bodemkunde. Laboratorium Algemene Bodemkunde, Universiteit Gent, 116 p.
- Bakker, T.W.M., 1981.** Nederlandse kustduinen. Geohydrologie. Pudoc, Wageningen. 189 p.
- Bragg, T., Webb, N., Spencer, R., Wood, J., Nicholl, C. & Potter, E., 1991.** AP4 porometer User Manual. Cambridge, Engeland. 189 p.
- Choudhury, B., 1987.** Implications of stomatal response to saturation deficit for the heat balance of vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36: 215-225.
- Cienciala, E., Kucera, J., Lindroth, A., Cermak, J., Grelle, A. & Halldin, S., 1997.** Canopy transpiration from a boreal forest in Sweden during a dry year. *Agricultural and Forest Meteorology*, 86: 157-167.
- Dolman, A.J. & Van Den Burg, G.J., 1988.** Stomatal behaviour in an oak canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 43: 99-108.
- Granier, A. & Loustau, D., 1994.** Measuring and modelling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71: 61-81.
- Granier, A. & Bréda, N., 1996.** Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements. *Annales des Sciences Forestières*, 53: 537-546.
- Granier, A., Loustau, D. & Bréda, N., 2000.** A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Annals of Forest Science*, 57: 755-765.
- Herbst, M., 1995.** Stomatal behaviour in a beech canopy: an analysis of Bowen ratio measurements compared with porometer data. *Plant, Cell and Environment*, 18: 1010-1018.
- Herbst, M., Eschenbach, C. & Kappen, L., 1999.** Water use in neighbouring stands of beech (*Fagus sylvatica* L.) and black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). *Annals of Forest Science*, 56: 107-120.
- Halldin, S., Saugier, B. & Pontailier, J.Y., 1984.** Evapotranspiration of a deciduous forest: simulation using routine meteorological data. *Journal of Hydrology*, 75: 323-341.

**Jarvis, P.G., 1976.** The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, 273: 596-610.

**Kelliher, F.M., Leuning, R., Raupach, M.R. & Schulze, E.D., 1995.** Maximum conductances for evaporation from global vegetation types. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73: 1-16.

**Larcher, W., 2001.** *Physiological plant ecology. Ecophysiological and stress physiology of functional groups.* 4th edition, Berlin, Springer. 513 p.

**Le Maitre, D.C., Scott, D.F. & Colvin, C., 1999.** A review of information on interactions between vegetation and groundwater. *Water SA*, 25:137-152.

**Lohammar, T., Larsson, S., Linder, S. & Falk, S., 1980.** Fast-Simulation models of gaseous exchange in Scots pine. *Ecological Bulletins*, 32: 505-523.

**Meyboom, P., 1967.** Groundwater studies in the Assiniboine river drainage basin. Part II: Hydrologic characteristics of Phreatophytic vegetation in South-Central Saskatchewan, Geological survey of Canada, Bulletin 139, Department of energy, mines and resources.

**Ogink-Hendriks, M.J., 1995.** Modelling surface conductance and transpiration of an oak forest in The Netherlands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74: 99-118.

**Pollet, S., Derycke, T., Samson, R., Lemeur, R. & Bleyaert, P., 1997.** Optimalisatie van een teeltsysteem los van de ondergrond bij de teeltrotatie komkommer / botersla onder glas. Verslag, Ministerie van Middenstand en Landbouw, Bestuur voor Onderzoek en Ontwikkeling, Overeenkomst nr D 1/2-5728A-sectie 2.

**Provoost, S. & Hoffmann, M. e. d., 1996.** *Ecosysteemvisie voor de Vlaams Kust. I. Ecosysteembeschrijving.* 375 p.

**Provoost, S. & Hoffmann, M. e. d., 1996.** *Ecosysteemvisie voor de Vlaams Kust. I. Ecosysteembeschrijving, bijlagen.*

**Samson, R., 2001.** An experimental and modelling approach to the actual evapotranspiration in a mixed forests ecosystem (Experimental forest Aelmoeseneie at Gontrode). Gent, Universiteit Gent. 294 p.

**Schaminée, J.H.J., Stortelder, A.H.F., Westhoff, V., 1995.** *De vegetatie van Nederland. Deel 1. Inleiding tot de plantensociologie – grondslagen, methoden en toepassingen.* Opulus press, Leiden, 296 p.

**Schenk, H.J. and Jackson, R.B., 2002.** Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plan in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*, 90: 480-492.

**Scholz, F.G., Bucci, S.J., Goldstein, G., Meinzer, F.C. & Franco, A.C., 2002.** Hydraulic redistribution of soil water by neotropical savanna trees. *Tree Physiology*, 22: 603-612.



**Schuurman, J.J. & Goedewagen, M.A.J., 1965.** Methods for the examination of root systems and roots. Methods in use at the Institute for Soil Fertility for eco-morphological root investigations. Pudoc, Wageningen.

**Steppe, K., 2001.** Porometry. Gent, Universiteit Gent. 8 p.

**Stewart, J.B., 1988.** Modelling surface conductance of Pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 43: 19-35.

**Van Brempt, A., 1994.** Invloed van ijzer-, zink- en koperverontreiniging op een aantal fotosynthese- en groeideterminerende karakteristieken van Riet (*Phragmites australis*). Gent, Universiteit Gent, 172 p.

**Vanden Abeele, L., 2001.** Transpiratie van kruid- en struikvegetaties in de duinvalleien van het natuurreservaat De Westhoek. Gent, Universiteit Gent. 149 p.

**Vázquez, R.F.Z., Feyen, L., Christianens, K., Abu El-Nasr, A. & Feyen, J., 1999.** Calibration and validation of the distributed physically based hydrological MIKE SHE model, with application to the Gete basin. Interne publicatie nr. 55. Instituut voor land- en waterbeheer, Leuven, Katholieke Universiteit.

**Verbeeck, H., 2002.** Modellering van de koolstof- en waterdampuitwisseling tussen een gemengd loofbos en de atmosfeer. Gent, universiteit Gent, 174 p.

**Vermoortel, Y., 1990.** Karakterisatie van bodems en plantenwortels in een kustduinvalleienecosysteem in het natuurreservaat De Westhoek (West-Vlaanderen). Gent, Universiteit Gent. 217 p.

**Verstraeten, W.W., Minnaert, M., et al., 2001.** Vlaams impulsprogramma natuurontwikkeling. Kwantitatieve analyse van de verdamping van bossen in vergelijking met weide en akkerland. VLINA99/06. 225 p.

**White, W.N., 1932.** A method of estimating groundwater supplies based on discharge by plants and evaporation from soil. *Am. Soc. Agronomy*. Ed. Luthin, J.N., 461-505.

**Williams, T.G. & Flanagan, L.B., 1996.** Effect of changes in water content on photosynthesis, transpiration and discrimination against  $^{13}\text{CO}_2$  and  $\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$  in *Pleurozium* and *Sphagnum*, *Oecologia*, 108: 38-46.

